



TESIS - TM 142501

**OPTIMASI KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, DAN PANJANG
UPSET HASIL LASAN BAJA SUH 3 PADA PENGELASAN GESEK
MENGUNAKAN METODE RESPON PERMUKAAN DAN GOAL
PROGRAMMING**

MOCHAMAD MUZAKI
NRP 2114201002

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)



THESIS - TM 142501

**OPTIMATION OF TENSILE STRENGTH, HARDNESS, AND UPSET
LENGTH OF WELD OF SUH 3 STEEL ON FRICTION WELDING
USING RESPONSE SURFACE AND GOAL PROGRAMMING**

MOCHAMAD MUZAKI
NRP 2114201002

SUPERVISOR
Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc

MAGISTER PROGRAM
FIELD STUDY OF MANUFACTURING SYSTEM AND ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMEN
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**LEMBAR PENGESAHAN
TESIS**

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
Di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:
Mochamad Muzaki
NRP. 2114201002**

**Tanggal Ujian: Senin, 18 Juli 2016
Periode Wisuda: Semester Genap 2015/2016**

Disetujui Oleh

**1. Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc
NIP: 195204171979031002**


(Pembimbing I)

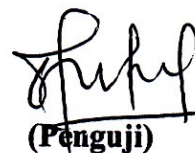
**2. Arif Wahyudi, ST, MT, Ph.D
NIP: 197303222001221001**


(Penguji)

**3. Dr.Eng. Sutikno, ST, MT
NIP: 197407032000031001**


(Penguji)

**4. Suwarno, ST, M.Sc, Ph.D
NIP: 198005202005011003**


(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana


**Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 196012021987011001**

**OPTIMASI KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, DAN PANJANG
UPSET HASIL LASAN BAJA SUH 3 PADA PENGELASAN GESEK
MENGUNAKAN METODE *RESPONSE SURFACE* DAN
*GOAL PROGRAMMING***

Mahasiswa : Mochamad Muzaki
NRP : 2114201002
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc

ABSTRAK

Metode pengelasan dalam kondisi padat sering digunakan pada proses penyambungan komponen-komponen benda kerja. Las gesek merupakan salah satu metode pengelasan kondisi padat yang menghasilkan lasan ketika dua benda kerja berputar relatif satu terhadap yang lain disertai tekanan.

Pemilihan parameter untuk pengelasan gesek ini merupakan faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses pengelasan. Dalam penelitian ini pemilihan dan optimasi parameter pengelasan dipelajari dan dianalisis dengan metode respon permukaan dan goal programming. Penelitian dilakukan menggunakan dua material sejenis, yaitu baja SUH 3 untuk mendapatkan respon kekuatan, kekerasan, dan panjang *upset* dari lasan. Kecepatan putaran spindel, gaya gesek, dan gaya tempa, merupakan parameter yang akan divariasikan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan optimum didapatkan pada pengaturan kecepatan putaran spindel sebesar 1500, gaya gesek sebesar 5,8 kN, dan gaya tempa sebesar 10 kN. Hasil kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan optimum berturut-turut adalah sebesar 122,8 kgf/mm², 6,9 mm, dan 41,2 HRC.

Kata kunci: las gesek, optimasi, *response surface*, *goal programming*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**OPTIMATION OF TENSILE STRENGTH, HARDNESS, AND
UPSET LENGTH OF WELD OF SUH 3 STEEL ON FRICTION
WELDING USING RESPONSE SURFACE AND
GOAL PROGRAMMING.**

Student : Mochamad Muzaki
NRP : 2114201002
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc

ABSTARCT

Solid state welding method is often used in process of joining components of the workpiece. Friction welding is one of the solid welding method that produces a weld when two workpieces rotating relative to one another under certain pressure.

Selection of the process parameter in friction welding plays an important role that determine the success of the welding process. In this research, the selection and optimisation of welding parameters are studied and analyzed by the response surface method and goal programming. This work was conducted using two similar materials, SUH 3 steel, to obtain responses of tensile strength and upset length of weld. Spindle rotating speed, friction force, and forge force are parameters varied.

The result show that the optimum tensile strength, upset length, and hardness is obtained in using 1500 rpm spindle rotating speed, 5,8 kN friction force, and 10 kN forge force. The optimum tensile strength, upset length, and hardness are 122,8 kgf/mm², 6,9 mm, and 41,2 HRC, respectively.

Keywords: friction welding, optimisation, response surface, *goal programming*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Alloh Azza Wa Jalla – Tuhan yang menguasai langit dan bumi serta segala apa yang ada di antara keduanya – atas karunia, rahmat dan kenikmatan yang telah dilimpahkan-Nya dalam setiap detak jantungku, sehingga tesis yang berjudul “OPTIMASI KEKUATAN TARIK, KEKERASAN, DAN PANJANG *UPSET* HASIL LASAN BAJA SUH 3 PADA PENGELASAN GESEK MENGGUNAKAN METODE *RESPONSE SURFACE* DAN *GOAL PROGRAMMING*” ini dapat terselesaikan dengan baik. Semoga sholawat serta salam tetap tercurah kepada junjungan kita, Rosululloh Muhammad Solallahu ‘Alaihi Wassalam hingga akhir zaman.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dari berbagai pihak, penyusunan tesis ini tidak akan tersusun dengan baik. Oleh karena itu, dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir., Bambang Pramujati, M.Sc.Eng.,Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan jajarannya.
2. Bapak Prof.,Ir.,Djauhar Manfaat, M.Sc.,Ph.D., selaku Direktur Pasca Sarjana, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan jajarannya.
3. Bapak Prof.,Dr.,Ir.,Abdullah Shahab, M.Sc., selaku dosen pembimbing tesis yang senantiasa memberikan bimbingan, nasehat, dan motivasinya sehingga tesis ini bisa terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Arif Wahyudi, ST.,MT.,Ph.D., Bapak Dr.Eng.,Sutikno,ST.,MT., dan Bapak Suwarno, ST.,M.Sc.,Ph.D., atas masukan-masukannya yang sangat membantu dalam penyelesaian penyusunan tesis ini.
5. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, atas setiap ilmu, nasehat, dan motivasi yang diberikan selama ini.
6. Seluruh karyawan dan staf Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, atas segala bantuan yang telah diberikan.

7. Bapak-bapak pimpinan dan rekan-rekan PT. Federal Nittan Industries.
8. Ibunda Nuraini dan mendiang Abah M. Syafi'I Bakri tercinta –semoga rahmat Alloh selalu terlimpah kepada Ibunda dan Abah– untuk setiap untaian doa, tetesan keringat, tawa, air mata, dan nasehatnya. Segala pencapaian Ananda adalah buah hasil kasih sayang yang telah Ibunda dan Abah berikan.
9. Istriku tercinta, Wasiska Iyati, yang telah datang dalam hidupku membawakan kebahagiaan, semangat, harapan, dan doa.
10. Kedua Kakakku Daris Salamah dan M. Syafrudin serta kedua Adikku M. Fatchul Arifi dan Fachrur Rozy, setiap dari kalian memiliki peran berarti yang tak terbantahkan dalam hidupku.
11. Ketiga Kakak Iparku, Yoyok Lofendi, Chanifa Asmara, dan Thantien Hidayati, atas dukungan dan doa yang telah diberikan dengan segenap ketulusan hati.
12. Teman-teman Jurusan Teknik Mesin, khususnya bidang keahlian Rekayasa dan Sistem Manufaktur angkatan 2014 – Hiding, Abid, Ali, Benedictus, Anhar, Balkhaya, Jariyanti, Sufiyanto, Thenny, dan Firman – atas kebersamaan yang memberi arti sangat mendalam dalam perjalanan hidupku.
13. Teman-teman Jurusan Teknik Material – Fahriadi, Saddam, dan Yulianti – untuk bantuan dan dukungannya selama proses pengerjaan tesis ini.
14. Semua pihak yang tidak dapat Saya sebutkan satu-persatu dalam memberi dukungan demi kelancaran pekerjaan tesis ini.

Akhirnya semoga Allah Azza Wa Jalla menjadikan tesis ini berguna dan bermanfaat bagi banyak pihak dan senantiasa melindungi serta meridhoi setiap langkah dan perbuatan Kita.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan dan Asumsi	5
BAB 2 DASAR TEORI	7
2.1 Definisi Las	7
2.2 Klasifikasi Proses Pengelasan	7
2.3 Las Gesek	8
2.4 Parameter Proses Las Gesek	9
2.5 Kualitas Hasil Las dan Evaluasi Produk	10
2.6 Metode <i>Response Surface</i>	10
2.7 Goal Programming	11
2.8 Penelitian Terdahulu	11
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Langkah-Langkah Penelitian	13

3.2 Penetapan Variabel Penelitian	14
3.3 Menetapkan Level Parameter Percobaan	14
3.4 Perencanaan Desain Eksperimen	16
3.5 Persiapan Eksperimen	17
3.6 Pelaksanaan Eksperimen	18
3.7 Pengukuran Respon	19
3.7.1 Panjang <i>upset</i>	19
3.7.2 Kekuatan tarik	20
3.7.3 Kekerasan	21
3.8 Analisis Respon	23
3.9 Optimasi Respon	24
3.10 Penelitian Konfirmasi	24
3.11 Harapan Penelitian	25

BAB 4 HASIL DAN ANALISIS DATA

4.1 Hasil Percobaan	27
4.2 Analisis Respon Kekuatan Tarik	28
4.2.1 Uji Pengaruh Faktor Terhadap Respon Kekuatan Tarik	28
4.2.2 Uji Kesesuaian Model Respon Kekuatan Tarik	31
4.2.3 Uji Residual Kekuatan Tarik	32
4.3 Analisis Respon Panjang <i>Upset</i>	33
4.3.1 Uji Pengaruh Faktor Terhadap Respon Panjang <i>Upset</i>	33
4.3.2 Uji Kesesuaian Model Respon Panjang <i>Upset</i>	36
4.3.3 Uji Residual Panjang <i>Upset</i>	37
4.4 Analisis Respon Kekerasan	38
4.4.1 Uji Pengaruh Faktor Terhadap Respon Kekerasan	38
4.4.2 Uji Kesesuaian Model Respon Kekerasan	41
4.4.3 Uji Residual Kekerasan	42
4.5 Optimasi dengan <i>Goal Programming</i>	43
4.5.1 Perhitungan Sasaran Prioritas Pertama	43
4.5.2 Perhitungan Sasaran Prioritas Ke Dua	44
4.5.3 Perhitungan Sasaran Prioritas Ke Tiga	46

4.5.4 Prediksi nilai Respon Optimum	48
4.6 Pengujian Konfirmasi	48

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	52

DAFTAR PUSTAKA	53
----------------------	----

LAMPIRAN-LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengujian Tarik	55
Lampiran 2. Data Pengujian Panjang <i>Upset</i>	56
Lampiran 3. Data Pengujian Kekerasan	57
Lampiran 4. Uji Residual Kekuatan Tarik	58
Lampiran 5. Uji Residual Panjang <i>Upset</i>	61
Lampiran 6. Uji Residual Kekerasan	64
Lampiran 7. Perhitungan <i>Goal Programming</i> Kekuatan Tarik $\geq 90 \text{ kgf/mm}^2$	67
Lampiran 8. Perhitungan <i>Goal Programming</i> Panjang <i>Upset</i> $\leq 7 \text{ mm}$	69
Lampiran 9. Perhitungan <i>Goal Programming</i> Panjang <i>Upset</i> $\geq 4 \text{ mm}$	71
Lampiran 10. Perhitungan <i>Goal Programming</i> Kekerasan $\geq 40 \text{ HRC}$	73
Lampiran 11. Uji-T Satu Sampel Pengujian Konfirmasi	75
Lampiran 12. Regresi <i>Response Surface</i> Kekuatan Tarik	76
Lampiran 13. Regresi <i>Response Surface</i> Panjang <i>Upset</i>	78
Lampiran 14. Regresi <i>Response Surface</i> Kekerasan	85

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Skema Langkah-Langkah Dasar dalam Proses Las Gesek ...	8
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	15
Gambar 3.2 Dimensi Benda Kerja Material A dan Material B	20
Gambar 3.3 Mesin Las Gesek	20
Gambar 3.4 Layar Monitor Hasil Pengukuran Proses Pengelasan	21
Gambar 3.5 Benda Kerja Hasil Proses Las Gesek	21
Gambar 3.6 Benda Kerja Setelah Proses Gerinda	22
Gambar 3.7 (a) Benda Kerja Setelah Pemberian Tarik (b) Ukuran Benda Kerja dengan Takik	22
Gambar 3.8 Alat Uji Tarik yang Digunakan Dalam Penelitian	23
Gambar 3.9 Benda Kerja Dipotong Melintang	23
Gambar 3.10 (a) Mesin <i>Mounting</i> (b) Mesin Gosok	24
Gambar 3.11 Benda Kerja Uji Kekerasan	24
Gambar 3.12 Alat Uji Kekerasan	25
Gambar 4.1 Grafik Plot <i>Surface</i> Kekuatan Tarik	32
Gambar 4.2 Grafik Plot Kontur Kekuatan Tarik	32
Gambar 4.3 Grafik Plot <i>Surface</i> Panjang <i>Upset</i>	36
Gambar 4.4 Grafik Plot Kontur Panjang <i>Upset</i>	37
Gambar 4.5 Grafik Plot <i>Surface</i> Kekerasan	41
Gambar 4.6 Grafik Plot Kontur Kekerasan	42

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	13
Tabel 3.1 Variabel dalam Penelitian	16
Tabel 3.2 Tiga Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Alami	17
Tabel 3.3 Tiga Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Kode	17
Tabel 3.4 Lima Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Kode	18
Tabel 3.5 Lima Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Alami	18
Tabel 3.6 Desain Eksperimen <i>Central Composite Design</i>	19
Tabel 3.7 Komposisi Paduan Kimia Baja SUH 3	20
Tabel 4.1 Data Hasil Percobaan	29
Tabel 4.2 Perkiraan Koefisien Regresi pada Respon Kekuatan Tarik ...	31
Tabel 4.3 Analisis Varian (ANOVA) Kekuatan Tarik	33
Tabel 4.4 Perkiraan Koefisien Regresi pada Respon Panjang <i>Upset</i>	35
Tabel 4.5 Analisis Varian (ANOVA) Panjang <i>Upset</i>	38
Tabel 4.6 Perkiraan Koefisien Regresi pada Respon Kekerasan	40
Tabel 4.7 Analisis Varian (ANOVA) Kekerasan	43
Tabel 4.8 Prediksi Nilai Respon Optimum	49
Tabel 4.9 Data Pengujian Konfirmasi	50

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejak berakhirnya Perang Dunia I, beberapa metode pengelasan telah dikembangkan untuk menyambung logam, baik metode las dalam kondisi fusi maupun las dalam kondisi padat. Pengelasan fusi adalah proses penggabungan material yang menggunakan peleburan dari sebagian material induk untuk membuat sebuah sambungan las. Las kondisi fusi yang sering digunakan di antaranya adalah las gas oksiasetilen, las busur logam terselubung, dan las busur terendam. Sementara itu, pengelasan kondisi padat adalah proses penyambungan material dengan temperatur di bawah titik lebur material. Salah satu jenis pengelasan kondisi padat yang paling sering digunakan hingga saat ini adalah las gesek atau *friction welding*.

Las gesek adalah metode pengelasan kondisi padat yang menghasilkan benda las ketika dua benda kerja berputar atau bergerak relatif satu sama lain. Benda kerja yang berputar atau bergerak diberikan tekanan untuk menghasilkan panas dan deformasi plastis pada antarmuka material benda kerja.

Secara umum las gesek dibagi menjadi dua jenis, yaitu las gesek penggerak inersia (*inertia-drive*) dan las gesek penggerak langsung (*direct-drive*). Kualitas proses las gesek seringkali dilihat dari aspek sifat mekanik produk yang dihasilkan, terutama kekerasan dan kekuatan tariknya. Hal ini dilakukan karena kedua sifat mekanik tersebut cukup mewakili sifat mekanik lain dari produk las gesek di samping prosedur pengujian kekerasan dan kekuatan tarik yang relatif mudah.

Panjang *upset* yang dihasilkan pada proses pengelasan seringkali juga merupakan kualitas yang perlu diperhatikan. Pengaruh parameter terhadap panjang *upset* ini merupakan hal yang perlu dipelajari karena bisa digunakan untuk mengetahui efisiensi proses las gesek terutama yang terkait dengan biaya produksi secara keseluruhan.

Hingga saat ini para peneliti masih terus melakukan berbagai penelitian untuk memahami proses las gesek dengan lebih baik. Kirik dan Ozdemir (2014) melakukan penelitian dengan judul “Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Welded Joints of AISI 1040/AISI 304L Steels” melaporkan bahwa putaran spindel pada kecepatan rendah dengan waktu yang lebih lama dan tekanan rendah akan menghasilkan kekerasan sambungan yang tinggi. Sebaliknya, kecepatan putaran spindel tinggi dengan waktu singkat dan tekanan tinggi akan menghasilkan kekuatan sambungan yang tinggi.

Sementara itu, Periyasamy, P. dkk. (2015) melakukan penyambungan material beda jenis, baja tahan panas (*heat resisting steel*) austenitik dan martensitik, pada penelitiannya yang berjudul “Optimization of Friction Welding Process to Eliminate Forking in Engine Valves,” mengemukakan bahwa gaya tekan yang digunakan dalam pengelasan material tersebut bisa mencapai tiga kali lebih besar dari gaya geseknya, dengan nilai gaya gesek dan tekan maksimal berturut-turut adalah 9,5 dan 28,5 kN. Pada proses tersebut, kecepatan putaran spindel bisa mencapai 2000 rpm.

Viswanathan, G. dkk (2015) dalam penelitiannya dengan judul “Optimization of Mechanical Properties of Friction Welding Parameters of Austenitic Stainless Steel (AISI 316) Rods Using Design of Experiments Concept,” memvariasikan tekanan gesek, tekanan tempa, dan waktu gesek untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekerasan dan kekuatan tarik hasil las. Hasil penelitian menunjukkan tekanan gesek memegang peranan penting dalam hal meningkatkan kekerasan sambungan, dimana kekerasan tertinggi didapat ketika tekanan gesek diatur pada level tertinggi. Sementara itu, kekuatan tarik sangat dipengaruhi oleh waktu tempa.

Pada penelitiannya yang berjudul “Application of Response Surface Methodology to Maximize Tensile Strength and Minimize Interface Hardness of Friction Welded Dissimilar Joints of Austenitic Stainless Steel and Copper Alloy,” Vairmani, G. dkk (2013) melakukan upaya optimasi parameter proses las gesek dengan tujuan mendapatkan kekuatan tarik maksimal dan kekerasan minimal dari sambungan las. Parameter proses yang dipilih adalah kecepatan putaran spindel,

laju tekanan gesek, dan laju tekanan tempa. Hasil percobaan konfirmasi dibanding analisis optimasi menunjukkan nilai error hasil kekuatan tarik berada pada rentang -2,8 sampai dengan 3,6%. Sedangkan nilai error hasil kekerasan berada pada rentang -3,8 sampai dengan 4,6%. Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah metode *Response Surface Methodology* dengan desain eksperimen *central composite design*.

Metode optimasi *response surface* dianggap paling mewakili tujuan dari proses optimasi sebenarnya. Karena kondisi optimal yang didapat dari analisis ini selalu mengarahkan pada global optimum. Dalam beberapa aplikasi, metode *response surface* dapat dikombinasikan dengan metode *goal programming*.

Goal programming merupakan suatu metode untuk menghitung nilai optimum dari beberapa tujuan secara serentak. Konsep *goal programming* adalah meminimalkan simpangan dari tujuan. Hal ini dilakukan dengan mengespresikan tujuan itu dalam bentuk sebuah kendala (*goal constraint*), memasukkan suatu variabel simpangan (*deviational variable*) dalam kendala itu untuk mencerminkan seberapa jauh simpangan atau deviasi dari tujuan. Perhitungan *goal programming* akan berhenti ketika upaya pemenuhan sasaran pada tujuan dengan prioritas yang lebih rendah tidak dapat dilakukan lagi kecuali dengan meningkatkan deviasi sasaran pada tujuan dengan prioritas di atasnya.

Pada penelitian ini akan dilakukan upaya proses optimasi dari parameter proses las gesek menggunakan dua material sejenis, yaitu baja SUH 3, untuk mendapatkan respon kekuatan tarik dan kekerasan yang tinggi serta panjang *upset* yang rendah. Proses desain eksperimen dilakukan dengan menggunakan *central composite design*. Selanjutnya dilakukan analisis hubungan antara parameter dengan respon menggunakan metode *response surface*. Optimasi dengan *goal programming* kemudian dilakukan untuk mengetahui level parameter yang dapat menghasilkan respon optimum dengan memerhatikan beberapa kendala respon maupun parameter proses.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan sebelumnya, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh dari kecepatan putaran spindel, gaya gesek, dan gaya tempa sebagai parameter proses las gesek material baja SUH 3 terhadap respon berupa kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan menggunakan metode *response surface*.
2. Bagaimana kombinasi nilai yang tepat dari masing-masing parameter tersebut agar menghasilkan respon optimal dengan batasan beberapa kendala menggunakan metode *goal programming*.

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang ada, maka tujuan penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh dari kecepatan putaran spindel, gaya gesek, dan gaya tempa sebagai parameter proses las gesek material baja SUH 3 terhadap kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan menggunakan metode *response surface*.
2. Mengetahui kombinasi nilai yang tepat dari masing-masing parameter tersebut agar menghasilkan respon optimal dengan batasan beberapa kendala menggunakan metode *goal programming*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi acuan pelaku industri las gesek khususnya yang menggunakan proses dan material yang sama dengan penelitian ini.
2. Menjadi referensi bagi akademisi yang akan melakukan penelitian serupa.
3. Menambah khasanah keilmuan khususnya dalam bidang las gesek dan optimasi.

1.5 Batasan dan Asumsi

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan fokus, maka dibuat batasan-batasan penelitian sebagai berikut:

1. Pengelasan hanya dilakukan pada benda kerja silindis dengan diameter 7,4 mm.
2. Waktu gesek pada proses pengelasan dibuat konstan, yaitu selama 1 detik.
3. Waktu *upset* pada proses pengelasan dibuat konstan, yaitu selama 1 detik.

Adapun asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan dalam penelitian bersifat homogen.
2. Mesin las gesek yang digunakan dalam kondisi baik dan stabil.
3. Mesin pengujian yang digunakan dalam kondisi baik dan stabil.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Definisi Las

Sambungan las (*weld*) didefinisikan oleh *American Welding Society* (AWS) sebagai “penyatuan setempat dari material logam atau material bukan logam yang dihasilkan melalui pemanasan material untuk mencapai temperatur las, baik dengan atau tanpa memberikan tekanan dan dengan atau tanpa menggunakan material pengisi (*filler*).”

2.2 Klasifikasi Proses Pengelasan

Pengelasan diklasifikasikan berdasarkan sumber energi dan tingkat temperaturnya. Berdasarkan tingkat temperatur proses yang digunakan, pengelasan dibagi menjadi dua, yaitu pengelasan fusi (*fusion welding*) dan pengelasan kondisi padat (*solid-state welding*).

1. Pengelasan fusi

Pengelasan fusi adalah proses penggabungan material yang menggunakan peleburan dari sebagian material induk untuk membuat sebuah sambungan las. Tiga jenis pengelasan fusi yang utama adalah sebagai berikut:

- a. Pengelasan gas: las oksiasetilen.
- b. Pengelasan busur: *shelded metal arc welding*, *gas tungsten arc welding*, *gas metal arc welding*, *plasma arc welding*.
- c. Pengelasan *high-energy beam*: *electron beam welding* dan *laser beam welding*.

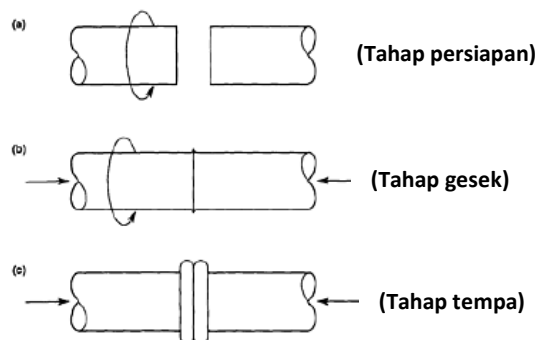
2. Pengelasan kondisi padat

Pengelasan kondisi padat adalah proses penyambungan material dengan temperatur di bawah titik lebur material. Proses pengelasan jenis ini tidak membutuhkan material tambahan sebagai pengisi untuk membentuk sambungan. Fenomena utama dari pengelasan kondisi padat adalah fenomena difusi dan deformasi. Beberapa jenis pengelasan yang

dikategorikan dalam pengelasan kondisi padat di antaranya adalah las difusi, las tempa, las tekanan panas, dan las gesek.

2.3 Las Gesek

Las gesek atau *friction welding* adalah metode pengelasan kondisi padat yang menghasilkan benda las ketika dua benda kerja berputar atau bergerak relatif satu sama lain, benda kerja yang berputar atau bergerak diberikan tekanan untuk menghasilkan panas dan deformasi plastis pada antarmuka material benda kerja. Proses las gesek dilakukan tanpa adanya pemberian panas dari sumber lain, sehingga proses sangat tergantung dari konversi langsung energi mekanik (gesekan) menjadi energi panas untuk membentuk sambungan las. Seperti halnya jenis pengelasan kondisi padat lainnya, proses las gesek secara normal tidak terjadi peleburan pada antarmuka benda kerja.



Gambar 2.1 Skema Langkah-Langkah Dasar dalam Proses Las Gesek.

(a) Tahap Persiapan, (b) Tahap Gesek, (c) Tahap Tempa.

(Nunes, M.R. dkk, 1993)

Gambar 2.1 menunjukkan proses las gesek. Gambar 2.1-(a) adalah tahap persiapan, dimana salah satu benda kerja berputar, sedangkan benda kerja lainnya ditahan dalam kondisi diam. Gambar 2.1-(b) merupakan tahap gesek, yaitu saat benda kerja dikontakkan satu sama lain dan diberikan gaya aksial untuk mengawali proses *upset*. Sedangkan Gambar 2.1-(c) adalah tahap tempa, dimana benda kerja yang berputar dihentikan dan proses *upset* selesai.

Kecepatan putaran, tekanan aksial, dan waktu pengelasan adalah parameter-parameter penting yang harus dikendalikan agar menghasilkan kombinasi yang tepat antara panas dan tekanan untuk membentuk sambungan las.

2.4 Parameter Proses Las Gesek

Parameter proses las gesek yang dibahas di sini adalah parameter las gesek penggerak langsung. Terdapat tiga parameter yang mengontrol karakteristik dari pengelasan pada las gesek penggerak langsung, yaitu kecepatan putaran spindel, gaya aksial (gaya gesek dan gaya tempa), dan waktu pengelasan (waktu gesek dan waktu tempa).

1. Kecepatan putaran spindel

Fungsi dari putaran pada las gesek adalah untuk menghasilkan kecepatan relatif pada kedua permukaan kontak dari benda kerja. Dari sudut pandang kualitas las, kecepatan putaran merupakan variabel yang paling mudah diatur, karena bisa bervariasi pada rentang yang cukup lebar.

2. Gaya aksial

Rentang nilai gaya aksial pada proses las gesek berbeda-beda tergantung kondisi proses pengelasan itu sendiri. Karena gaya aksial berinteraksi dengan parameter-parameter lain dalam proses las gesek, maka harus dipastikan bahwa besarnya gaya aksial yang dipilih benar-benar mampu dioperasikan bersamaan dengan nilai parameter lain yang telah dipilih. Besarnya gaya aksial berpengaruh pada beberapa aspek. Pertama, memengaruhi besarnya gradien temperatur pada zona sambungan. Ke dua, berpengaruh pada besarnya daya yang dibutuhkan untuk mampu menggerakkan spindel, dan yang ke tiga memengaruhi besarnya pemendekan aksial (panjang *upset*) selama tahapan tempa.

3. Waktu pengelasan

Waktu gesek ditentukan dengan cara “*trial and error*” pada saat pengaturan parameter mesin atau berdasarkan pengalaman sebelumnya. Waktu gesek yang terlalu lama akan mengurangi produktivitas, membuang banyak material, dan mungkin memiliki dampak negatif pada sifat sambungan. Sebaliknya, waktu gesek yang terlalu singkat mungkin bisa berakibat tidak meratanya pemanasan, terperangkapnya oksida, dan terdapat area pada antarmuka yang tidak menyatu.

2.5 Kualitas Hasil Las dan Evaluasi Produk

Pengendalian kualitas las dan evaluasi produk harus bersandar pada pengendalian proses dan mesin yang digunakan untuk membuat produk las. Pada proses las gesek penggerak langsung, baik kecepatan putaran, gaya aksial, maupun waktu proses, mengakibatkan pemendekan pada arah aksial atau *upset*. Secara umum, panjang *upset* meningkat hampir linier terhadap waktu gesek. *Upset* yang terjadi selama waktu gesek, yang sering disebut *friction burn off*, sangat berpengaruh pada kualitas hasil las.

Selain *upset*, kualitas produk las gesek tentunya juga ditinjau dari sifat mekaniknya. Di antara pengujian sifat mekanik yang sering dilakukan pada produk hasil las gesek adalah uji tarik. Pada pengelasan material sejenis (*similar material*), umumnya kekuatan tarik sambungan memiliki kekuatan lebih tinggi dibanding pada kedua material induknya, sedangkan pada pengelasan material berbeda jenis (*dissimilar material*) kekuatan tarik sambungan akan lebih tinggi dari kekuatan tarik material induk salah satu material benda kerja yang memiliki kekuatan lebih rendah. Selain kekuatan tarik, uji kekerasan biasanya juga dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada batas sambungan menuju ke material induk.

2.6 Metode *Response Surface*

Metode *response surface* adalah sebuah penggabungan teknik statistika dan matematika yang sangat bermanfaat untuk pemodelan dan analisis masalah, dimana respon yang diamati dipengaruhi beberapa variabel dan tujuan akhirnya adalah mengoptimalkan respon tersebut. Pada kebanyakan permasalahan RSM, bentuk dari hubungan antara respon dan variabel bebas tidak diketahui. Sehingga langkah pertama pada RSM adalah menemukan pendekatan yang cocok untuk hubungan fungsional yang benar antara “y” dan keseluruhan dari variabel bebas. Biasanya, pada kasus seperti ini pemodelan akan diawali dengan memostulasikan persamaan linier pada beberapa wilayah dari variabel bebas. Jika respon dimodelkan dengan baik oleh fungsi linear dari variabel bebas, maka fungsi pendekatannya adalah **model orde pertama**.

$$y = \beta_0 + \beta_1\xi_1 + \beta_2\xi_2 + \dots + \beta_k\xi_k + \varepsilon \quad (2.1)$$

Jika terdapat kurva pada sistem, maka harus digunakan polinomial dari derajat yang lebih tinggi, seperti **model orde kedua**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.2)$$

Seluruh permasalahan pada RSM menggunakan salah satu atau kedua model tersebut.

2.7 Goal Programming

Dalam permasalahan optimasi, seringkali kita dihadapkan pada tuntutan mengoptimalkan tidak hanya satu melainkan banyak tujuan. Biasanya tujuan-tujuan tersebut dibuat dengan urutan skala prioritas. Upaya untuk mencapai tujuan-tujuan seperti ini bisa dicapai dengan bantuan metode *goal programming*. *Goal programming* mencari solusi optimum dari beberapa tujuan tersebut berdasarkan urutan prioritas yang telah dibuat. Tujuan dengan prioritas yang lebih rendah secara bertahap akan diperhatikan setelah tujuan pada prioritas yang lebih tinggi sudah tercapai.

Konsep *goal programming* adalah meminimalkan simpangan dari tujuan. Hal ini dilakukan dengan mengkespresikan tujuan itu dalam bentuk sebuah kendala (*goal constraint*), memasukkan suatu variabel simpangan (*deviational variable*) dalam kendala itu untuk mencerminkan seberapa jauh simpangan atau deviasi dari tujuan. Perhitungan *goal programming* akan berhenti ketika upaya pemenuhan sasaran pada tujuan dengan prioritas yang lebih rendah tidak dapat dilakukan lagi kecuali dengan meningkatkan deviasi sasaran pada tujuan dengan prioritas di atasnya.

2.8 Penelitian Terdahulu

Hingga saat ini terdapat banyak penelitian terkait proses las gesek, baik penelitian dengan konsep optimasi maupun pengamatan fenomena. Tabel 2.1 menampilkan beberapa penelitian tentang proses las gesek.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

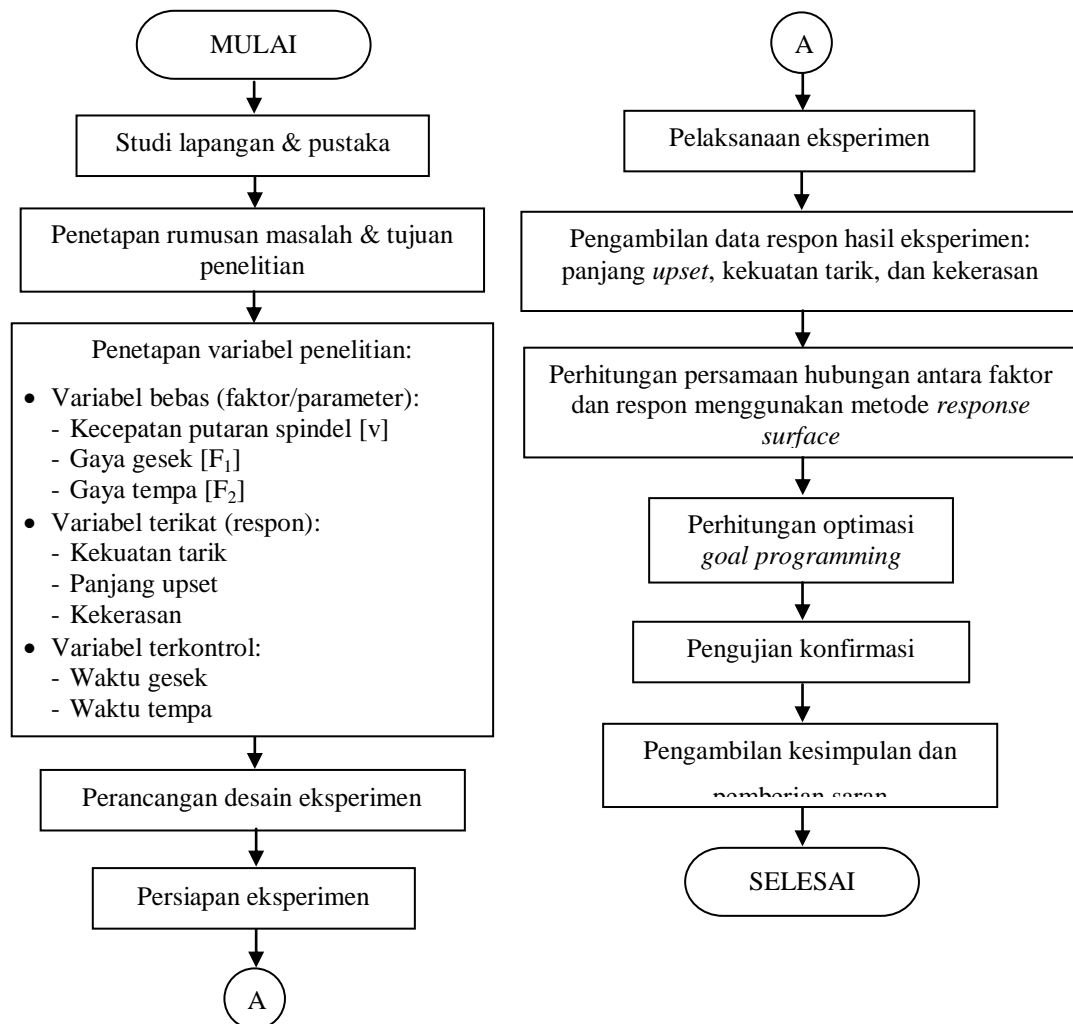
No	Nama, (tahun)	Material	Optimasi	Faktor	Respon	Hasil
1	Periyasamy, P. dkk., (2015)	<i>Heat resisting steel</i>	Taguchi	Kec.putaran, gaya gesek, gaya tempa, panjang <i>upset</i>	Cacat <i>forking</i>	Kecepatan putaran spindel dan panjang <i>upset</i> tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap cacat <i>forking</i> . Sementara itu, pengaturan level gaya <i>upset</i> direkomendasikan tiga kali lebih besar dari gaya gesek.
2	Viswanathan, G. dkk., (2015)	AISI 316	Taguchi	Tekanan gesek, tekanan tempa, waktu tempa	Tekanan gesek, tekanan tempa, waktu tempa	Tekanan gesek memegang peranan penting dalam hal meningkatkan kekerasan antarmuka, dimana kekerasan tertinggi didapat ketika tekanan gesek diatur pada level tertinggi. Sementara itu, kekuatan tarik sangat dipengaruhi oleh waktu tempa.
3	Kirik dan Ozdemir, (2014)	AISI 1040-AISI 304L	—	Kec.putaran, gaya gesek, waktu gesek	Kekerasan, kekuatan tarik	Kombinasi parameter yang menghasilkan kekerasan tinggi akan menghasilkan kekuatan tarik rendah, begitu juga sebaliknya.
4	Vairmani, G. dkk., (2013)	baja <i>stainless</i> austenit dan tembaga paduan	<i>Response surface</i>	Kec.putaran, laju tekanan gesek, laju tekanan tempa	Kekerasan, kekuatan tarik	kombinasi paramater yang menghasilkan respon optimal adalah kecepatan putaran sebesar 23 rad/det, laju tekanan gesek sebesar 17,5 MPa/det, dan laju tekanan tempa sebesar 12,8 MPa/det. Hasil percobaan konfirmasi menunjukkan nilai error hasil kekuatan tarik berada pada rentang - 2,8 sampai dengan 3,6%. Sedangkan nilai error hasil kekerasan berada pada rentang -3,8 sampai dengan 4,6%.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Langkah-Langkah Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan pengamatan lapangan dan juga literatur-literatur terkait yang dilanjutkan dengan identifikasi masalah. Hasil akhir dari penelitian diharapkan mendapatkan rekomendasi nilai parameter proses las gesek untuk mendapatkan respon optimum. Untuk mempermudah memahami prosedur dalam penelitian ini, perhatikan diagram alir yang memuat langkah-langkah penelitian pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Penetapan Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini diklasifikasikan dalam tiga kelompok, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol. Dalam penelitian ini, variabel bebas yang dipilih adalah parameter proses yang bisa secara langsung diatur melalui peralatan kontrol yang terdapat pada mesin las gesek yang digunakan. Adapun parameter yang dapat diatur secara langsung dari mesin ini adalah kecepatan putaran spindel (rpm), gaya gesek (kN), gaya tempa (kN), waktu gesek (detik), dan waktu tempa (detik). Selanjutnya dipilih tiga dari lima parameter yang tersedia untuk mendapatkan penelitian yang lebih fokus.

Pemilihan parameter dilakukan dengan menguji signifikansi parameter terhadap respon yang diinginkan. Untuk memenuhi tujuan ini, dilakukan penelitian pendahuluan guna mengetahui parameter yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon. Selanjutnya hasil penelitian ini dianalisis menggunakan uji statistik analisis varian satu arah untuk mengetahui parameter mana yang berpengaruh terhadap respon yang dipilih. Adapun variabel-variabel yang dipilih ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel dalam Penelitian

Variabel Bebas/Faktor	Variabel Terikat/Respon	Variabel Terkontrol
Kec.putaran, v [rpm]	Kekuatan tarik [kgf/mm ²]	Waktu gesek, T_1 [detik]
Gaya gesek, F_1 [kN]	Panjang <i>upset</i> [mm]	Waktu tempa, T_2 [detik]
Gaya tempa, F_2 [kN]	Kekerasan antarmuka [HRC]	

3.3 Menetapkan Level Parameter Percobaan

Level dari faktor atau parameter percobaan ditentukan dari hasil percobaan pendahuluan. Percobaan pendahuluan ini dilakukan dengan memilih sejumlah nilai level dari masing-masing parameter dengan nilai yang relatif rendah sampai dengan nilai yang relatif tinggi. Kemudian, dilakukan analisis statistik uji t-saling bebas untuk mengetahui rentang nilai level yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon. Level dari masing-masing faktor yang dipilih disajikan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Tiga Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Alami

No	Faktor	Satuan	Level		
			Rendah	Tengah	Tinggi
1	Kecepatan putaran spindel, v	rpm	1250	1500	1750
2	Gaya gesek, F_1	kN	3	5	7
3	Gaya tempa, F_2	kN	6	10	14

Nilai 1250 sampai dengan 1750 rpm, 3 sampai dengan 7 kN, dan 6 sampai dengan 14 kN berturut-turut disebut variabel alami v, variabel alami F_1 , dan variabel alami F_2 . Nilai ketiga variabel alami tersebut dapat diubah dalam bentuk variabel kode menurut Persamaan 3.1. Level dari masing-masing faktor dalam bentuk variabel kode dapat dilihat pada Tabel 3.3.

$$X_i = \frac{(2\xi_i - (\xi_{iH} + \xi_{iL}))}{(\xi_{iH} - \xi_{iL})} \quad (3.1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, k$.

Dengan ξ_{iH} dan ξ_{iL} adalah level tinggi dan rendah dari faktor.

Tabel 3.3 Tiga Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Kode

No	Faktor	Satuan	Level		
			Rendah	Tengah	Tinggi
1	Kecepatan putaran spindel, v	rpm	-1	0	1
2	Gaya gesek, F_1	kN	-1	0	1
3	Gaya tempa, F_2	kN	-1	0	1

Karena dalam penelitian ini dikehendaki setiap faktor memiliki 5 level, maka masing-masing faktor ditambahkan suatu nilai “-alfa” di bawah level rendah dan suatu nilai “+alfa” di atas level atas. Nilai “-alfa” dan “+alfa” dalam bentuk variabel kode, berturut-turut adalah -1,682 dan 1,682. Nilai lima level faktor penelitian dalam bentuk variabel kode ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Lima Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Kode

No.	Faktor	Satuan	Level				
			–alfa	rendah	tengah	tinggi	+alfa
1	Kecepatan putaran spindel, v	rpm	–1,682	–1	0	1	1,682
2	Gaya gesek, F_1	kN	–1,682	–1	0	1	1,682
3	Gaya tempa, F_2	kN	–1,682	–1	0	1	1,682

Dengan menggunakan Persamaan 3.1, level masing-masing faktor dapat dituliskan kembali dalam bentuk variabel alami sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Lima Level Faktor Penelitian dalam Bentuk Variabel Alami

No	Faktor	Satuan	Level				
			–1,682	–1	0	1	1,682
1	Kecepatan putaran spindel, v	Rpm	1079	1250	1500	1750	1920
2	Gaya gesek, F_1	kN	1,64	3	5	7	8,36
3	Gaya tempa, F_2	kN	3,27	6	10	14	16,72

3.4 Perencanaan Desain Eksperimen

Desain eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah desain eksperimen *central composite design* yang merupakan bagian dari metode *response surface*. Adapun desain eksperimen dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Desain Eksperimen *Central Composite Design*

No. Perc.	Parameter						Kekuatan Tarik (kgf/mm ²)	Panjang Upset (mm)	Kekerasan (HRC)
	Variabel Kode			Variabel Alami					
	v	F ₁	F ₂	V	F ₁	F ₂			
1	0	0	0	1500	5	10	Y _{1.1}	Y _{2.1}	Y _{3.1}
2	0	0	0	1500	5	10	Y _{1.2}	Y _{2.2}	Y _{3.2}
3	0	0	0	1500	5	10	Y _{1.3}	Y _{2.3}	Y _{3.3}
4	-1	1	-1	1250	7	6	Y _{1.4}	Y _{2.4}	Y _{3.4}
5	0	0	0	1500	5	10	Y _{1.5}	Y _{2.5}	Y _{3.5}
6	0	0	0	1500	5	10	Y _{1.6}	Y _{2.6}	Y _{3.6}
7	0	-1,682	0	1500	1,64	10	Y _{1.7}	Y _{2.7}	Y _{3.7}
8	1	1	-1	1750	7	6	Y _{1.8}	Y _{2.8}	Y _{3.8}
9	-1	-1	-1	1250	3	6	Y _{1.9}	Y _{2.9}	Y _{3.9}
10	-1	-1	1	1250	3	14	Y _{1.10}	Y _{2.10}	Y _{3.10}
11	1	1	1	1750	7	14	Y _{1.11}	Y _{2.11}	Y _{3.11}
12	0	0	0	1500	5	10	Y _{1.12}	Y _{2.12}	Y _{3.12}
13	-1	1	1	1250	7	14	Y _{1.13}	Y _{2.13}	Y _{3.13}
14	0	0	-1,682	1500	5	3,27	Y _{1.14}	Y _{2.14}	Y _{3.14}
15	1	-1	-1	1750	3	6	Y _{1.15}	Y _{2.15}	Y _{3.15}
16	1	-1	1	1750	3	14	Y _{1.16}	Y _{2.16}	Y _{3.16}
17	0	1,682	0	1500	8,36	10	Y _{1.17}	Y _{2.17}	Y _{3.17}
18	0	0	1,682	1500	5	16,72	Y _{1.18}	Y _{2.18}	Y _{3.18}
19	1,682	0	0	1920,5	5	10	Y _{1.19}	Y _{2.19}	Y _{3.19}
20	-1,682	0	0	1079,5	5	10	Y _{1.20}	Y _{2.20}	Y _{3.20}

Pada Tabel 3.6 bisa dilihat kombinasi level dari masing-masing parameter yang akan digunakan dalam percobaan. Kombinasi level disajikan dalam bentuk variabel kode dan variabel alami. Masing-masing kombinasi level akan menghasilkan produk las gesek yang akan diuji kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan.

3.5 Persiapan Eksperimen

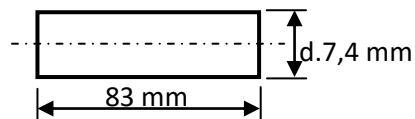
Persiapan eksperimen dimulai dengan menyiapkan material yang akan disambung melalui proses las gesek. Material yang digunakan adalah baja SUH 3 yang merupakan jenis baja tahan panas dalam standar JIS. Komposisi paduan kimia dari baja SUH 3 ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Komposisi Paduan Kimia Baja SUH 3

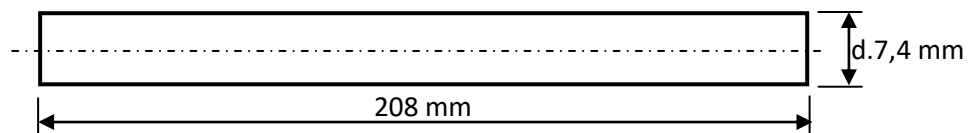
Komposisi Kimia	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Persen Berat (%)	0,35-0,45	1,8-2,5	Maks. 0,6	Maks. 0,03	Maks. 0,03	10-12	Maks. 0,6	0,7-1,3

Persiapan material dilakukan dengan memotong material SUH 3 berbentuk silindris dengan diameter 7,4 mm dan panjang 4000 mm menjadi dua ukuran panjang yang berbeda, spesimen A dan spesimen B, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Spesimen A:



Spesimen B:



Gambar 3.2 Dimensi Spesimen A dan Spesimen B

3.6 Pelaksanaan Eksperimen

Untuk melakukan proses las gesek, spesimen A diposisikan pada pencekam yang tidak berputar, sedangkan spesimen B diletakkan pada pencekam yang berputar. Gambar 3.3 menunjukkan gambar mesin yang digunakan untuk penelitian.



Gambar 3.3 Mesin Las Gesek

Item Measured	Code		Middle	Lower	Upper	Measured	Unit
Material Length	L-L	(mm)	291.00	-3.00	2.90	290.99	OK
Product Length	TL-L	(mm)	285.00	-9.00	9.00	287.10	OK
Total Approach	U-L	(mm)	6.50	-6.50	6.00	3.89	OK
Friction Thrust	F1-L	(N)	5.00	-0.05	0.05	4.99	OK
Upset Thrust	F2-L	(N)	10.00	-0.05	0.05	9.99	OK
Friction Time	T1-L	(s)	1.00	-0.05	0.05	1.01	OK
Material Length	L-A	(mm)	89.0	-2.0	2.0		
Material Length	L-B	(mm)	207.0	-3.0	2.0		

Gambar 3.4 Layar Monitor Hasil Pengukuran Proses Pengelasan

Langkah selanjutnya adalah proses pengelasan yang diawali dengan mengatur parameter proses sesuai dengan desain eksperimen. Pengaturan parameter proses dilakukan melalui alat pengaturan yang sudah tersedia pada mesin. Besarnya nilai parameter proses aktual dikontrol oleh peralatan ukur yang terpasang pada mesin, kemudian nilainya diinformasikan melalui sebuah monitor yang terdapat pada mesin sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.4. Benda kerja hasil pengelasan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Benda Kerja Hasil Proses Las Gesek

3.7 Pengukuran Respon

Setelah dilakukan proses pengelasan gesek sesuai dengan desain eksperimen, langkah selanjutnya adalah pengukuran respon yang terdiri dari panjang *upset*, kekuatan tarik, dan kekerasan.

3.7.1 Panjang *Upset*

Pengukuran panjang *upset* dilakukan secara otomatis oleh mesin las gesek setiap kali selesai melakukan proses las gesek. Hasil

pengukuran ditampilkan pada monitor yang terdapat pada mesin las gesek sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.4.

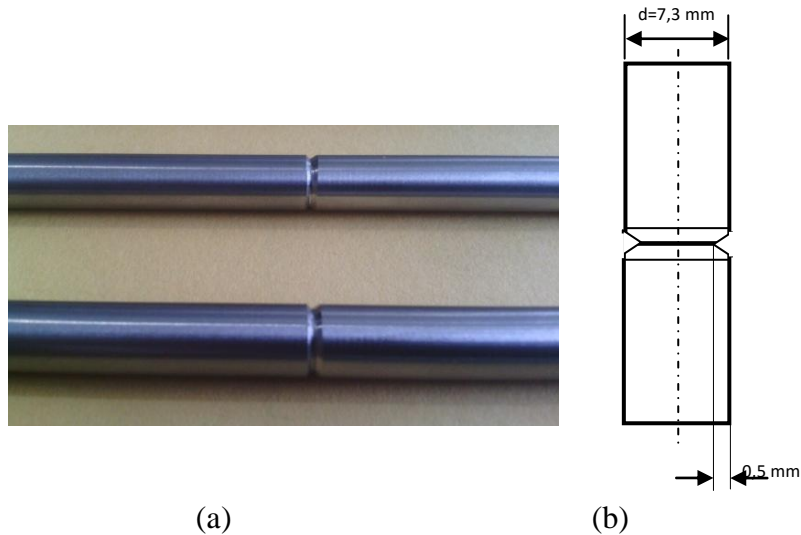
3.7.2 Kekuatan Tarik

Sebelum dilakukan pengukuran kekuatan tarik, benda kerja diberikan proses tambahan berupa penggerindaan. Penggerindaan dilakukan untuk menghilangkan *flash* hasil pengelasan. Penggerindaan mengakibatkan pengecilan diameter sebesar 0,1 mm. Benda kerja hasil penggerindaan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Benda Kerja Setelah Proses Gerinda

Kemudian benda kerja diberi takik tepat pada garis sambungan pengelasan, pemberian takik dilakukan melalui proses bubut. Gambar 3.7 menunjukkan benda kerja setelah pemberian takik.



Gambar 3.7 (a) Benda Kerja Setelah Pemberian Takik
(b) Ukuran Benda Kerja dengan Takik

Setelah proses gerinda dan pemberian takik selesai, benda kerja diproses uji kekuatan tarik menggunakan *universal tensile machine* sebagaimana ditunjukkan Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Alat Uji Tarik yang Digunakan dalam Penelitian

3.7.3 Kekerasan

Pengukuran kekerasan dalam penelitian ini dilakukan pada sambungan antarmuka benda kerja. Sebelum dilakukan pengukuran, benda kerja dipotong melintang kemudian dipotong dengan panjang material A dan B masing-masing sepanjang 15 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Benda Kerja Dipotong Melintang

Selanjutnya benda kerja dipasang padaudukan dengan cara proses *mounting* untuk mempermudah proses pengukuran. Kemudian benda kerja dibersihkan dan diratakan dengan menggunakan kertas gosok dengan tingkat kekasaran 220, 400, 800, 1200, 2000, dan 5000. Gambar 3.10 menunjukkan mesin *mounting* dan mesin gosok yang digunakan dalam penelitian.



(a)



(b)

Gambar 3.10 (a) Mesin *Mounting*, (b) Mesin Gosok

Setelah selesai proses *mounting* dan gosok, selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan pada benda kerja. Gambar 3.11 menunjukkan benda kerja yang sudah siap diuji kekerasan setelah dilakukan proses *mounting* dan penggosokan.



Gambar 3.11 Benda Kerja Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan mesin uji kekerasan *vickers* yang memiliki konversi satuan ke dalam HRC, selanjutnya nilai kekerasan diukur dan dicatat dengan satuan HRC. Gambar 3.12 menunjukkan mesin pengujian kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.12 Alat Uji Kekerasan

3.8 Analisis Respon

Setelah didapat data respon panjang *upset*, kekuatan tarik, dan kekerasan untuk seluruh percobaan, selanjutnya data dianalisis menggunakan metode *response surface* orde dua, analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak statistik. Analisis faktor terhadap respon mencakup model linear, kuadratik, dan juga interaksi antar faktor. Dalam tahap ini diharapkan didapatkan model persamaan yang cocok, dengan ditunjukkan tidak adanya *lack of fit* atau *lack of fit* tidak signifikan.

Dari analisis ini akan diketahui, faktor mana yang memberi pengaruh signifikan terhadap respon. Selanjutnya akan dibuat persamaan regresi dari faktor-faktor yang memiliki pengaruh signifikan tersebut. Adapun persamaan regresi yang mungkin terbentuk adalah sebagai berikut:

$$y = \beta_0 + \beta_1 V + \beta_2 F_1 + \beta_3 F_2 + \beta_{1,2} V * F_1 + \beta_{1,3} V * F_2 + \beta_{2,3} F_1 * F_2 + \beta_{1,1} V^2 + \beta_{2,2} F_1^2 + \beta_{3,3} F_2^2 \quad (3.2)$$

Dengan demikian akan terdapat tiga persamaan regresi yang masing-masing mewakili kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan.

3.9 Optimasi Respon

Analisis optimasi respon secara serentak dilakukan dengan perangkat lunak statistik riset operasi. Sebelum dilakukan analisis optimasi, perlu dilakukan penetapan prioritas respon dan nilai yang diharapkan. Adapun prioritas dan nilai yang diharapkan dari masing-masing respon adalah sebagai berikut:

- Prioritas pertama:
Kekuatan tarik ≥ 90 [kgf/mm²]
- Prioritas ke dua:
Panjang *upset* 4 sampai 7 [mm]
- Prioritas ke tiga:
Kekerasan ≥ 30 [HRC]

Sementara itu, batasan masing-masing faktor ditentukan sebagai berikut:

$$\text{RPM} > -2; \text{RPM} < 2; F_1 > -2; F_1 < 2; F_2 > -2; F_2 < 2$$

3.10 Pengujian Konfirmasi

Setelah mendapatkan nilai parameter dari proses yang optimum, selanjutnya perlu dilakukan percobaan dengan pengaturan parameter sesuai dengan nilai parameter yang telah didapat. Tujuan dari percobaan ini adalah mengkonfirmasi, apakah benar dugaan parameter dan respon yang optimum sesuai dengan proses yang sebenarnya.

Langkah-langkah dalam penelitian konfirmasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a. Melakukan pengujian berdasarkan kombinasi parameter yang menghasilkan respon optimum pada analisis *goal programming*.
- b. Melakukan perhitungan statistik Uji-t 1 sampel untuk mengetahui apakah rata-rata hasil penelitian konfirmasi sama dengan nilai respon optimum hasil analisis *goal programming*.

Hipotesa null dari Uji-t 1 sampel adalah sebagai berikut:

$$H_0 = \mu_{\text{konfirmasi}} = \text{hasil analisis } \textit{goal programming}$$

$$H_1 = \mu_{\text{konfirmasi}} \neq \text{hasil analisis } \textit{goal programming}$$

Sementara itu kriteria penolakan H_0 null adalah sebagai berikut:

“Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$ ”

Perhitungan statistik Uji-t 1 sampel dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak statistik.

3.11 Harapan Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan bisa diperoleh informasi tentang pengaruh dari kecepatan putaran spindel, gaya gesek, dan gaya tempa sebagai parameter proses las gesek pada material baja SUH 3 terhadap respon kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan menggunakan metode *response surface*. Selain itu, dari penelitian ini—dengan memanfaatkan teknik goal programming—diharapkan juga bisa diperoleh nilai optimal parameter pengelasan untuk sebuah respon tertentu di bawah batasan kendala yang lain.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN ANALISIS DATA

4.1 Hasil Percobaan

Percobaan dilakukan sesuai dengan rancangan percobaan yang telah dibuat menggunakan metode *central composite design* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.6. Data hasil percobaan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Data Hasil Percobaan

No	Faktor (kode)			Respon		
	V	F ₁	F ₂	Kekuatan Tarik (kgf/mm ²)	Panjang Upset (mm)	Kekerasan (HRC)
1	0	0	0	124,2	6,14	40,5
2	0	0	0	123,2	6,31	40,7
3	0	0	0	123,8	6,32	40,8
4	-1	1	-1	122,8	6,62	47,5
5	0	0	0	124,2	6,05	40,5
6	0	0	0	123,2	5,37	40,6
7	0	-1,682	0	127,8	0,35	32
8	1	1	-1	119,2	6,60	49
9	-1	-1	-1	119,6	1,53	39,3
10	-1	-1	1	125	3,82	32,3
11	1	1	1	175,2	8,16	35,8
12	0	0	0	122	6,31	40,6
13	-1	1	1	117,4	7,83	32,7
14	0	0	-1,682	113,8	4,25	53
15	1	-1	-1	123,8	2,39	39,5
16	1	-1	1	188,6	5,32	34,5
17	0	1,682	0	118,2	9,10	41,9
18	0	0	1,682	162,6	7,83	36
19	1,682	0	0	170	5,37	36,8
20	-1,682	0	0	117,4	3,89	34

Sumber: Hasil percobaan

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1, percobaan pengelasan dilakukan sebanyak dua puluh kali. Percobaan pada kombinasi parameter dengan level tengah dilakukan pengulangan sebanyak lima kali untuk mendapatkan data *pure error*. Data *pure error* digunakan untuk menghitung *lack of fit* yang memberikan informasi kesesuaian model dari hubungan antara faktor dan respon.

4.2 Analisis Respon Kekuatan Tarik

Analisis respon kekuatan tarik terdiri dari uji pengaruh faktor terhadap respon, uji kesesuaian model, dan uji residual.

4.2.1 Uji Pengaruh Faktor Terhadap Respon Kekuatan Tarik

Uji pengaruh faktor terhadap respon dilakukan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh terhadap respon. Pengujian ini menggunakan hipotesa H_{null} , dimana hipotesa yang dibuat adalah sebagai berikut:

H_0 : Faktor tidak berpengaruh terhadap respon

H_1 : Faktor berpengaruh terhadap respon

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05. Level signifikansi menunjukkan tingkat kesalahan yang dapat diterima.

Tabel 4.2 menunjukkan faktor yang berpengaruh terhadap respon sekaligus perkiraan koefisien regresi pada respon kekuatan tarik. Tabel tersebut memberikan informasi jenis-jenis prediktor yang membentuk persamaan, yaitu konstanta, faktor V, F_1 , dan F_2 . Selain informasi jenis-jenis prediktor, Tabel 4.2 juga menampilkan perkiraan nilai koefisien persamaan. Signifikansi koefisien pembentuk persamaan bisa diprediksi dari nilai *standar error* koefisien (SE Koefisien), apabila nilai standar error dari koefisien membesar, hal ini menunjukkan H_0 akan cenderung gagal ditolak, artinya koefisien dari persamaan tidak signifikan. Selain itu, signifikansi juga dapat dihitung dari nilai T-hitung, jika T-hitung lebih besar dari T-tabel, maka koefisien berpengaruh signifikan terhadap respon. Selain melalui nilai SE koefisien dan T-hitung, signifikansi pengaruh koefisien terhadap respon juga bisa dilihat dari nilai P_{value} , apabila nilai P_{value} lebih kecil dari α , maka koefisien berpengaruh signifikan terhadap respon.

Pada penelitian ini, secara linear, faktor V, F₁, dan F₂ memiliki pengaruh signifikan terhadap variasi respon kekuatan tarik yang terjadi. Akan tetapi secara kuadrat, faktor F₁ tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap respon kekuatan tarik, hal ini ditunjukkan dengan nilai P_{value} yang lebih besar dari α , yaitu sebesar 0,957, hal ini berbeda dengan faktor V dan F₂ yang memiliki pengaruh terhadap respon kekuatan tarik secara kuadrat. Interaksi antar faktor, yaitu V*F₁, V*F₂, dan F₁*F₂, masing-masing memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik.

Tabel 4.2 Perkiraan Koefisien Regresi pada Respon Kekuatan Tarik

Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P_{value}
Konstanta	123,408	0,3561	346,59	0
V	15,41	0,2362	65,234	0
F1	-2,822	0,2362	-11,947	0
F2	14,854	0,2362	62,881	0
V*V	7,33	0,2299	31,877	0
F ₁ *F ₁	0,013	0,2299	0,056	0,957
F ₂ *F ₂	5,385	0,2299	23,422	0
V*F ₁	-1,7	0,3087	-5,508	0
V*F ₂	15,1	0,3087	48,921	0
F ₁ *F ₂	-2,45	0,3087	-7,938	0
R-Sq = 99,92% R-Sq (pred) = 99,60% R-Sq (adj) = 99,85%				

Sumber: Hasil perhitungan perangkat lunak statistik

Berdasarkan perkiraan koefisien regresi yang ditunjukkan pada Tabel 4.2, maka bisa dibuat persamaan fungsi yang menunjukkan hubungan antara faktor dan respon kekuatan tarik. Persamaan 4.1 menunjukkan persamaan fungsi yang menyatakan hubungan faktor V, F₁, dan F₂ dengan respon kekuatan tarik pada penelitian ini.

$$Y_1 = 123,41 + 15,41V - 2,82F_1 + 14,85F_2 + 7,33V*V + 5,38F_2*F_2 - 1,7V*F_1 + 15,1V*F_2 - 2,45F_1*F_2 \quad (4.1)$$

Dimana:

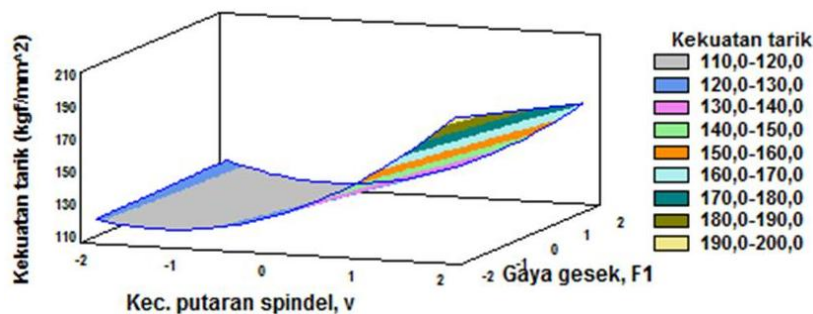
Y_1 : Respon kekuatan tarik

V : Faktor kecepatan putaran spindel

F_1 : Faktor gaya gesek

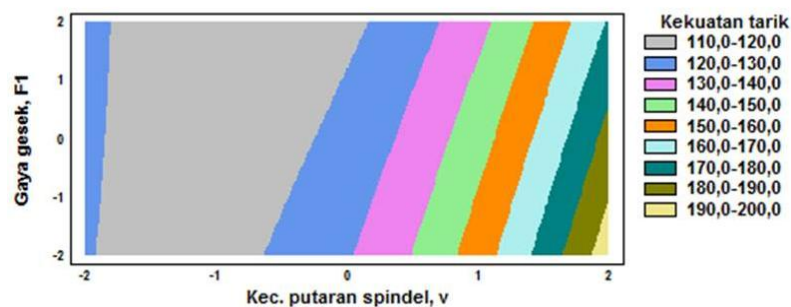
F_2 : Faktor gaya tempa

Persamaan fungsi hubungan antara faktor V, F_1 , dan F_2 dengan respon kekuatan tarik memiliki koefisien determinasi ($R-Sq$) sebesar 99,92%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi yang terjadi pada respon kekuatan tarik dipengaruhi oleh faktor dalam penelitian sebesar 99,92%.



Gambar 4.1 Grafik Plot *Surface* Kekuatan Tarik

Gambar 4.1 adalah grafik plot *surface* dari persamaan *response surface* kekuatan tarik. Grafik dibentuk dari faktor kecepatan putaran spindel (V) dan gaya gesek (F_1) terhadap respon kekuatan tarik, sedangkan gaya tempa (F_2) ditahan konstan pada level tengah. Dari grafik terlihat bahwa faktor pengelasan gesek dan repon kekuatan tarik memiliki hubungan kuadratik, hal ini bisa dilihat dari grafik yang berbentuk kurva.



Gambar 4.2 Grafik Plot Kontur Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik yang tinggi bisa dicapai dengan meningkatkan kecepatan putaran spindel dan menurunkan gaya gesek. Selain dari grafik plot *surface*, kaitan antara faktor pengelasan gesek dan respon kekuatan

tarik dapat dilihat pada plot kontur kekuatan tarik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2.

4.2.2 Uji Kesesuaian Model Respon Kekuatan Tarik

Uji kesesuaian model respon dilakukan dengan menggunakan analisis varian (ANOVA). Dalam hal ini, uji ANOVA memiliki hipotesa H_0 sebagai berikut:

H_0 : Model sesuai (tidak ada *lack of fit*)

H_1 : Model tidak sesuai (terdapat *lack of fit*)

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Tabel 4.3 menunjukkan hasil perhitungan ANOVA yang menyajikan data sumber keragaman (SK), derajat bebas (Db), jumlah kuadrat (JK), rata-rata kuadrat (RK), F_{hitung} , dan P_{value} .

Tabel 4.3 Analisis Varian (ANOVA) Kekuatan Tarik

SK	Db	JK	RK	F	P
Regression	9	9370,26	1041,14	1366,02	0
Linear	3	6365,81	2121,94	2784,07	0
V	1	3243,39	3243,39	4255,46	0
F_1	1	108,79	108,79	142,74	0
F_2	1	3013,63	3013,63	3954,02	0
Square	3	1109,23	369,74	485,12	0
$V*V$	1	687,12	774,49	1016,16	0
F_1*F_1	1	3,98	0	0	0,957
F_2*F_2	1	418,13	418,13	548,6	0
Interaction	3	1895,22	631,74	828,87	0
$V*F_1$	1	23,12	23,12	30,33	0
$V*F_2$	1	1824,08	1824,08	2393,27	0
F_1*F_2	1	48,02	48,02	63	0
Residual Error	10	7,62	0,76		
Lack-of-Fit	5	4,15	0,83	1,19	0,425
Pure Error	5	3,47	0,69		
TOTAL	19	9377,88			

Sumber: Hasil perhitungan perangkat lunak statistik

Selain menggunakan P_{value} , ada atau tidak adanya *lack of fit* juga bisa dilihat dari nilai F_{hitung} yang dibandingkan dengan F_{tabel} . Apabila F_{hitung} lebih besar dari F_{tabel} maka terdapat *lack of fit* pada model pendugaan. F_{hitung} bisa dicari melalui Db, JK, dan RK. Pada analisis tersebut terlihat bahwa *lack of fit* memiliki nilai P_{value} lebih besar dari α , yaitu sebesar 0,425, sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini berarti model pendugaan telah sesuai.

4.2.3 Uji Residual Kekuatan Tarik

Dalam menduga sebuah model diperlukan asumsi bahwa residual bersifat identik, independen, berdistribusi normal, dan varian konstan. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

1. Uji Identik

Grafik residual (lampiran 4) menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak di sekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual identik terpenuhi.

2. Uji Independen

Grafik plot *autocorrelation function* (lampiran 4) menunjukkan bahwa semua korelasi berada pada interval. Hal ini berarti bahwa pengamatan pada penelitian ini telah dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antar pengamatan.

3. Uji Kenormalan

Uji kenormalan dari residual dilakukan dengan *Kolmogorov-Smirnov Test*. Hipotesa untuk uji kenormalan dari residual adalah sebagai berikut:

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

Sedangkan kriteria penolakan H_0 adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika P_{value} lebih kecil dari α

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Grafik plot probabilitas dari residual (lampiran 4) memiliki nilai $P_{value} > \alpha$, yaitu sebesar 0,15, sehingga H_0 gagal ditolak. Dengan demikian residual mempunyai distribusi normal dan asumsi normalitas terpenuhi.

4. Uji Varian Konstan

Pengujian varian konstan dilakukan dengan menggunakan *Bartlett's Test* dan *Levene's Test*. Hipotesa H null untuk uji asumsi varian konstan adalah:

H_0 : Seluruh varian bernilai sama

H_1 : Paling tidak ada satu varian yang berbeda

Sementara itu kriteria penolakan H null adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$ (nilai alfa sebesar 0,05).

Hasil pengujian asumsi varian konstan dengan menggunakan *Bartlett's Test* dan *Levene's Test* menunjukkan P_{value} lebih besar dari α (lampiran 4), sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini berarti seluruh varian dari residual bernilai konstan.

4.3 Analisis Respon Panjang Upset

Analisis respon kekuatan tarik terdiri dari uji pengaruh faktor terhadap respon, uji kesesuaian model, dan uji residual.

4.3.1 Uji Pengaruh Faktor Terhadap Respon Panjang Upset

Uji pengaruh faktor terhadap respon dilakukan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh terhadap respon. Pengujian ini menggunakan hipotesa H null, dimana hipotesa yang dibuat adalah sebagai berikut:

H_0 : Faktor tidak berpengaruh terhadap respon

H_1 : Faktor berpengaruh terhadap respon

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Tabel 4.4 Perkiraan Koefisien Regresi pada Respon Panjang *Upset*

Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P _{value}
Konstanta	6,2267	0,04626	134,617	0
V	0,41584	0,03101	13,408	0
F ₁	2,08809	0,03827	54,561	0
F ₂	1,06396	0,03101	34,306	0
V*V	-0,568	0,02926	-19,41	0
F ₁ *F ₁	-0,23306	0,03625	-6,429	0
F ₂ *F ₂	-0,06961	0,02926	-2,379	0,049
V*F ₁	-0,19122	0,04309	-4,438	0,003
V*F ₂	0,18878	0,04309	4,381	0,003
F ₁ *F ₂	-0,24122	0,04309	-5,598	0,001
R-Sq = 99,88% R-Sq (pred) = 99,43% R-Sq (adj) = 99,72%				

Sumber: Hasil perhitungan perangkat lunak statistik

Tabel 4.4 menunjukkan faktor yang berpengaruh terhadap respon sekaligus perkiraan koefisien regresi pada respon panjang *upset*. Baik Secara linear, kuadratik, maupun interaksi, faktor V, F₁, dan F₂ memiliki pengaruh signifikan terhadap variasi respon panjang *upset* yang terjadi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai P_{value} pada semua faktor bernilai lebih kecil dari α .

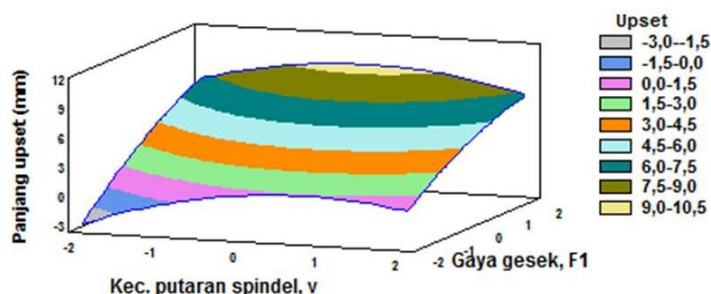
Berdasarkan perkiraan koefisien regresi yang ditunjukkan pada Tabel 4.4, maka bisa dibuat persamaan fungsi yang menunjukkan hubungan antara faktor dan respon panjang *upset*. Persamaan 4.2 menunjukkan persamaan fungsi yang menyatakan hubungan faktor V, F₁, dan F₂ dengan respon panjang *upset* pada penelitian ini.

$$Y_2 = 6,23 + 0,41V + 2,09F_1 + 1,06F_2 - 0,57V*V - 0,23F_1*F_1 - 0,07F_2*F_2 - 0,19V*F_1 + 0,19V*F_2 - 0,24F_1*F_2 \quad (4.2)$$

Dimana:

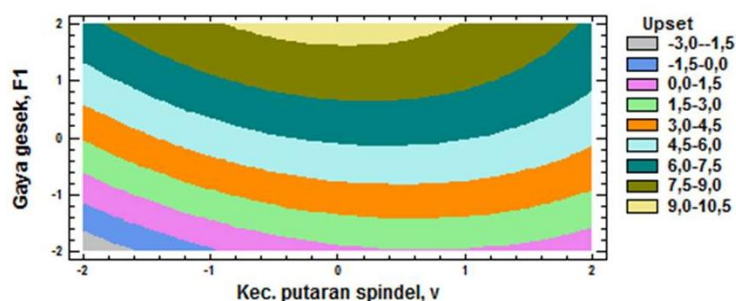
- Y₂ : Respon panjang *upset*
- V : Faktor kecepatan putaran spindel
- F₁ : Faktor gaya gesek
- F₂ : Faktor gaya tempa

Pada Persamaan 4.2, faktor V , F_1 , dan F_2 mampu menjelaskan variasi yang terjadi pada respon panjang *upset* dengan sangat baik. Hal ini ditandai dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mencapai 99,88%.



Gambar 4.3 Grafik Plot *Surface* Panjang *Upset*

Gambar 4.3 adalah grafik plot *surface* dari persamaan *response surface* panjang *upset*. Grafik dibentuk dari faktor kecepatan putaran spindel (V) dan gaya gesek (F_1) terhadap respon panjang *upset*, sedangkan gaya tempa (F_2) ditahan konstan pada level tengah. Dari grafik terlihat bahwa faktor dan respon panjang *upset* memiliki hubungan kuadratik, hal ini bisa dilihat dari grafik yang berbentuk kurva.



Gambar 4.4 Grafik Plot Kontur Panjang *Upset*

Pengaturan kecepatan putaran spindel pada level tengah dan gaya gesek yang tinggi bisa menghasilkan panjang *upset* yang tinggi. Sedangkan panjang *upset* yang rendah dicapai ketika kecepatan putaran spindel dan gaya gesek diatur pada level rendah. Selain dari grafik plot *surface*, kaitan antara faktor pengelasan gesek dan respon panjang *upset* dapat dilihat pada plot kontur panjang *upset* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4.

4.3.2 Uji Kesesuaian Model Respon Panjang *Upset*

Uji kesesuaian model respon dilakukan dengan menggunakan analisis varian (ANOVA). Dalam hal ini, uji ANOVA memiliki hipotesa H_0 *null* sebagai berikut:

H_0 : Model sesuai (tidak ada *lack of fit*)

H_1 : Model tidak sesuai (terdapat *lack of fit*)

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Tabel 4.5 menunjukkan hasil perhitungan ANOVA pada respon panjang *upset*. Pada analisis tersebut terlihat bahwa *lack of fit* memiliki nilai P_{value} lebih besar dari α , yaitu sebesar 0,827, sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini berarti model pendugaan telah sesuai.

Tabel 4.5 Analisis Varian (ANOVA) Panjang *Upset*

SK	Db	JK	RK	F	P
Regression	9	61,0837	6,7871	633,67	0
Linear	3	55,6355	12,8104	1196,02	0
V	1	0,548	1,9256	179,78	0
F ₁	1	39,7213	31,8847	2976,87	0
F ₂	1	15,3662	12,6057	1176,91	0
Square	3	4,4901	1,521	142,01	0
V*V	1	4,0073	4,0352	376,74	0
F ₁ *F ₁	1	0,439	0,4427	41,33	0
F ₂ *F ₂	1	0,0438	0,0606	5,66	0,049
Interaction	3	0,9581	0,3194	29,82	0
V*F ₁	1	0,2123	0,2109	19,69	0,003
V*F ₂	1	0,4101	0,2056	19,2	0,003
F ₁ *F ₂	1	0,3357	0,3357	31,34	0,001
Residual Error	7	0,075	0,0107		
Lack-of-Fit	3	0,0137	0,0046	0,3	0,827
Pure Error	4	0,0613	0,0153		
TOTAL	16	61,1586			

Sumber: Hasil perhitungan perangkat lunak statistik

4.3.3 Uji Residual Panjang *Upset*

Dalam menduga sebuah model diperlukan asumsi bahwa residual bersifat identik, independen, berdistribusi normal, dan varian konstan. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

1. Uji Identik

Grafik residual (lampiran 5) menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak di sekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual identik terpenuhi.

2. Uji Independen

Grafik plot *autocorrelation function* (lampiran 5) menunjukkan bahwa semua korelasi berada pada interval. Hal ini berarti bahwa pengamatan pada penelitian ini telah dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antar pengamatan.

3. Uji Kenormalan

Uji kenormalan dari residual dilakukan dengan *Kolmogorov-Smirnov Test*. Hipotesa untuk uji kenormalan dari residual adalah sebagai berikut:

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

Sedangkan kriteria penolakan H_0 adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika P_{value} lebih kecil dari α

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Grafik plot probabilitas dari residual (lampiran 5) memiliki nilai $P_{value} > \alpha$, yaitu sebesar 0,53, sehingga H_0 gagal ditolak. Dengan demikian residual mempunyai distribusi normal dan asumsi normalitas terpenuhi.

4. Uji Varian Konstan

Pengujian varian konstan dilakukan dengan menggunakan *Bartlett's Test* dan *Levene's Test*. Hipotesa H null untuk uji asumsi varian konstan adalah:

H_0 : Seluruh varian bernilai sama

H_1 : Paling tidak ada satu varian yang berbeda

Sementara itu kriteria penolakan H null adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P\text{ value} < \alpha$ (nilai alfa sebesar 0,05).

Hasil pengujian asumsi varian konstan dengan menggunakan *Bartlett's Test* dan *Levene's Test* menunjukkan P_{value} lebih besar dari α (lampiran 5), sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini berarti seluruh varian dari residual bernilai konstan.

4.4 Analisis Respon Kekerasan

Analisis respon kekerasan terdiri dari uji pengaruh faktor terhadap respon, uji kesesuaian model, dan uji residual.

4.4.1 Uji Pengaruh Faktor Terhadap Respon Kekerasan

Uji pengaruh faktor terhadap respon dilakukan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh terhadap respon. Pengujian ini menggunakan hipotesa $H\text{ null}$, dimana hipotesa yang dibuat adalah sebagai berikut:

H_0 : Faktor tidak berpengaruh terhadap respon

H_1 : Faktor berpengaruh terhadap respon

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Tabel 4.6 menunjukkan faktor yang berpengaruh terhadap respon sekaligus perkiraan koefisien regresi pada respon kekerasan. Baik Secara linear, kuadratik, maupun interaksi, faktor V , F_1 , dan F_2 memiliki pengaruh signifikan terhadap variasi respon kekerasan yang terjadi. Hal ini ditunjukkan dengan nilai P_{value} semua faktor bernilai lebih kecil dari α .

Tabel 4.6 Perkiraan Koefisien Regresi pada Respon Kekerasan

Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P _{value}
Konstanta	40,6167	0,04651	873,204	0
V	0,8573	0,03083	27,809	0
F ₁	2,425	0,04028	60,199	0
F ₂	-5,0222	0,03083	-162,901	0
V*V	-1,8439	0,03288	-56,076	0
F ₁ *F ₁	-1,3204	0,05857	-22,544	0
F ₂ *F ₂	1,3726	0,03288	41,743	0
V*F ₁	0,275	0,04028	6,827	0
V*F ₂	0,45	0,04028	11,171	0
F ₁ *F ₂	-2	0,04028	-49,649	0
R-Sq = 99,98% R-Sq (pred) = 99,87% R-Sq (adj) = 99,96%				

Sumber: Hasil perhitungan perangkat lunak statistik

Berdasarkan perkiraan koefisien regresi yang ditunjukkan pada Tabel 4.6, maka bisa dibuat persamaan fungsi yang menunjukkan hubungan antara faktor dan respon kekerasan. Persamaan 4.3 menunjukkan persamaan fungsi yang menyatakan hubungan faktor V, F₁, dan F₂ dengan respon kekerasan pada penelitian ini.

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 40,62 + 0,86V + 2,42F_1 - 5,02F_2 - 1,84V*V - 1,32F_1*F_1 \\
 & + 1,37F_2*F_2 + 0,27V*F_1 + 0,45V*F_2 - 2F_1*F_2
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Dimana:

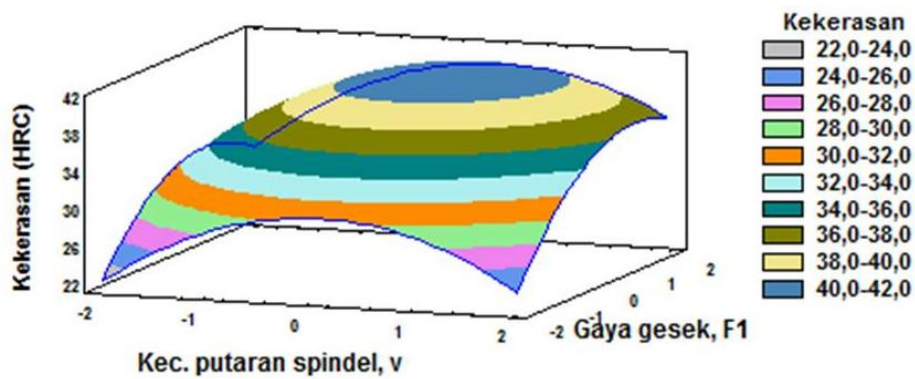
Y₃ : Respon kekerasan

V : Faktor kecepatan putaran spindel

F₁ : Faktor gaya gesek

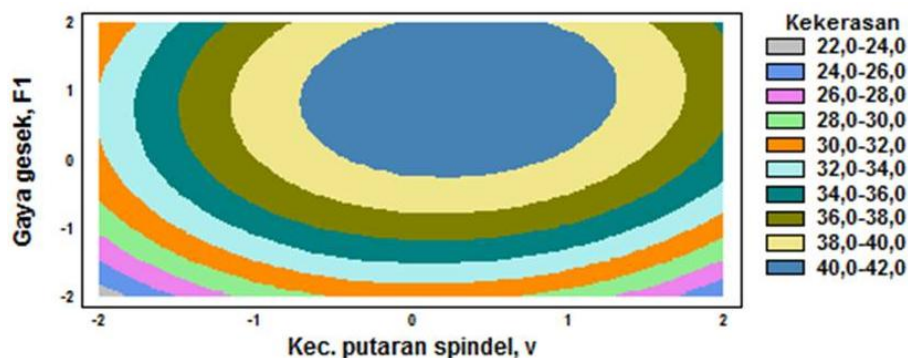
F₂ : Faktor gaya tempa

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.6, persamaan fungsi hubungan antara faktor V, F₁, dan F₂ dengan respon kekerasan memiliki koefisien determinasi (R-Sq) sebesar 99,98%.



Gambar 4.5 Grafik Plot *Surface* Kekerasan

Gambar 4.5 adalah grafik plot *surface* dari persamaan *response surface* kekerasan. Grafik dibentuk dari faktor kecepatan putaran spindel (V) dan gaya gesek (F_1) terhadap respon kekerasan, sedangkan gaya tempa (F_2) ditahan konstan pada level tengah. Dari grafik terlihat bahwa faktor dan respon kekerasan memiliki hubungan kuadratik, hal ini bisa dilihat dari grafik yang berbentuk kurva.



Gambar 4.6 Grafik Plot Kontur Kekerasan

Kekerasan pada sambungan las gesek bisa dicapai dengan mengatur kecepatan putaran spindel di antara level tengah dan tinggi serta gaya gesek pada level tinggi. Sedangkan gaya gesek yang rendah dan kecepatan putaran tinggi ataupun rendah akan menghasilkan kekerasan yang rendah. Selain dari grafik plot *surface*, kaitan antara faktor pengelasan gesek dan respon kekerasan dapat dilihat pada plot kontur kekerasan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6.

4.4.2 Uji Kesesuaian Model Respon Kekerasan

Uji kesesuaian model respon dilakukan dengan menggunakan analisis varian (ANAVA). Dalam hal ini, uji ANAVA memiliki hipotesa H_0 sebagai berikut:

H_0 : Model sesuai (tidak ada *lack of fit*)

H_1 : Model tidak sesuai (terdapat *lack of fit*)

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P_{value} < \alpha$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Tabel 4.7 menunjukkan hasil perhitungan ANAVA pada respon kekerasan. Pada analisis tersebut terlihat bahwa *lack of fit* memiliki nilai P_{value} lebih besar dari α , yaitu sebesar 0,517, sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini berarti model pendugaan telah sesuai.

Tabel 4.7 Analisis Varian (ANAVA) Kekerasan

SK	Db	JK	RK	F	P
Regression	9	530,012	58,89	4536,44	0
Linear	3	401,574	133,858	10311,37	0
V	1	10,039	10,039	773,32	0
F ₁	1	47,045	47,045	3623,97	0
F ₂	1	344,491	344,491	26536,82	0
Square	3	94,213	31,404	2419,14	0
V*V	1	70,211	40,82	3144,48	0
F ₁ *F ₁	1	1,381	6,597	508,22	0
F ₂ *F ₂	1	22,62	22,62	1742,5	0
Interaction	3	34,225	11,408	878,81	0
V*F ₁	1	0,605	0,605	46,6	0
V*F ₂	1	1,62	1,62	124,79	0
F ₁ *F ₂	1	32	32	2465,03	0
Residual Error	8	0,104	0,013		
Lack-of-Fit	3	0,036	0,012	0,87	0,517
Pure Error	5	0,068	0,014		
Total	17	530,116			

Sumber: Hasil perhitungan perangkat lunak statistik

4.4.3 Uji Residual Kekerasan

Dalam menduga sebuah model diperlukan asumsi bahwa residual bersifat identik, independen, dan berdistribusi normal. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap residual:

1. Uji Identik

Grafik residual (lampiran 6) menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak di sekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual identik terpenuhi.

2. Uji Independen

Grafik plot *autocorrelation function* (lampiran 6) menunjukkan bahwa semua korelasi berada pada interval. Hal ini berarti bahwa pengamatan pada penelitian ini telah dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antar pengamatan.

3. Uji Kenormalan

Uji kenormalan dari residual dilakukan dengan *Kolmogorov-Smirnov Test*. Hipotesa untuk uji kenormalan dari residual adalah sebagai berikut:

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

Sedangkan kriteria penolakan H_0 adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika P_{value} lebih kecil dari α

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05.

Grafik plot probabilitas dari residual (lampiran 6) memiliki nilai $P_{value} > \alpha$, yaitu sebesar 0,731, sehingga H_0 gagal ditolak. Dengan demikian residual mempunyai distribusi normal dan asumsi normalitas terpenuhi.

4. Uji Variabel Konstan

Pengujian varian konstan dilakukan dengan menggunakan *Bartlett's Test* dan *Levene's Test*. Hipotesa H null untuk uji asumsi varian konstan adalah:

H_0 : Seluruh varian bernilai sama

H_1 : Paling tidak ada satu varian yang berbeda

Sementara itu kriteria penolakan H_0 adalah sebagai berikut:

Tolak H_0 jika $P \text{ value} < \alpha$ (nilai alfa sebesar 0,05).

Hasil pengujian asumsi varian konstan dengan menggunakan *Bartlett's Test* dan *Levene's Test* menunjukkan P_{value} lebih besar dari α (lampiran 6), sehingga H_0 gagal ditolak. Hal ini berarti seluruh varian dari residual bernilai konstan.

4.5 Optimasi dengan *Goal Programming*

Perhitungan optimasi *goal programming* dilakukan dengan sebuah perangkat lunak statistik riset operasi. Perhitungan dilakukan berdasarkan urutan prioritas tujuan, yaitu kekuatan tarik minimal 90 kgf/mm², panjang upset 4 sampai dengan 7 mm, dan kekerasan minimal 40 HRC.

4.5.1 Perhitungan Sasaran Prioritas Pertama

Sasaran prioritas pertama dari respon penelitian adalah hasil pengelasan memiliki kekuatan tarik minimal sebesar 90 kgf/mm². Untuk mendapatkan kekuatan tarik minimal 90 kgf/mm² maka Persamaan 4.1 dijadikan sebuah kendala (*goal constraint*) dengan memasukkan suatu variabel simpangan (*deviational variable*) dalam kendala tersebut, sehingga Persamaan 4.1 menjadi:

$$123,41 + 15,41V - 2,82F_1 + 14,85F_2 + 7,33V*V + 0,01F_1*F_1 + 5,38F_2*F_2 - 1,7V*F_1 + 15,1V*F_2 - 2,45F_1*F_2 + d_1^- - d_1^+ = 90 \quad (4.4)$$

Selain kendala berupa *goal constraint*, dalam perhitungan optimasi juga perlu ditetapkan kendala-kendala untuk masing-masing faktor. Batasan setiap faktor tidak lagi dibuat sama dengan nilai level tertinggi dan terendah seperti pada desain eksperimen, yaitu +/-1,682, akan tetapi dibuat sedikit lebih tinggi dan lebih rendah menjadi +/-2. Hal ini untuk

mengantisipasi adanya kemungkinan nilai respon optimum didapat dengan mengatur faktor sedikit lebih rendah atau lebih tinggi dari level yang sudah ditetapkan sebelumnya. Kendala-kendala tersebut terdiri dari Persamaan 4.5 sampai dengan 4.10.

$$V \geq -2 \quad (4.5)$$

$$F_1 \geq -2 \quad (4.6)$$

$$F_2 \geq -2 \quad (4.7)$$

$$V \leq 2 \quad (4.8)$$

$$F_1 \leq 2 \quad (4.9)$$

$$F_2 \leq 2 \quad (4.10)$$

Setelah seluruh kendala telah ditetapkan, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai variabel-variabel dari seluruh persamaan dengan menetapkan sebuah fungsi objektif, yaitu meminimalkan simpangan atau deviasi dari Persamaan 4.1 sedemikian hingga didapatkan nilai kekuatan tarik minimal 90 kgf/mm². Dalam hal ini fungsi objektif yang ditetapkan adalah meminimalkan d_1^- .

Hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak didapatkan seluruh nilai variabel persamaan, salah satunya adalah nilai dari d_1^- , sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 4.11. perhitungan optimasi kekuatan tarik secara lengkap dapat dilihat pada lampiran 4.

$$d_1^- = 0 \quad (4.11)$$

4.5.2 Perhitungan Sasaran Prioritas Ke Dua

Prioritas sasaran ke dua dari respon penelitian ini adalah hasil pengelasan memiliki panjang *upset* 4 sampai dengan 7 mm. Untuk memenuhi tujuan tersebut, maka sasaran prioritas ke dua dibagi menjadi dua prioritas, yang pertama panjang *upset* maksimal 7 mm dan yang ke dua panjang *upset* minimal 4 mm. Untuk memenuhi sasaran panjang *upset* maksimal 7 mm maka Persamaan 4.2 dijadikan sebuah kendala (*goal*

constraint) dengan memasukkan suatu variabel simpangan (*deviational variable*) dalam kendala tersebut, sehingga Persamaan 4.2 menjadi:

$$6,23 + 0,41V + 2,09F_1 + 1,06F_2 - 0,57V*V - 0,23F_1*F_1 - 0,07F_2*F_2 - 0,19V*F_1 + 0,19V*F_2 - 0,24F_1*F_2 + d_2^- - d_2^+ = 7$$

(4.12)

Kemudian memasukkan batasan setiap faktor sebagaimana perhitungan sasaran prioritas pertama, yaitu Persamaan 4.5 sampai dengan 4.10. Selain batasan-batasan tersebut, dalam perhitungan ini juga dimasukkan Persamaan 4.4 dan 4.11 sebagai batasan yang memastikan sasaran prioritas di atasnya tetap terpenuhi.

Setelah seluruh batasan atau kendala telah ditetapkan, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai variabel-variabel dari seluruh persamaan dengan menetapkan sebuah fungsi objektif, yaitu meminimalkan simpangan atau deviasi dari Persamaan 4.12 sedemikian hingga didapatkan nilai panjang *upset* maksimal 7 mm. Dalam hal ini fungsi objektif yang ditetapkan adalah meminimalkan d_2^+ .

Hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak mendapatkan seluruh nilai variabel persamaan, salah satunya adalah nilai dari d_2^+ , sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 4.13. Perhitungan optimasi kekuatan tarik secara lengkap dapat dilihat pada lampiran 5.

$$d_2^+ = 0 \quad (4.13)$$

Perhitungan sasaran prioritas ke dua dilanjutkan dengan menghitung tujuan berupa panjang *upset* minimal 4 mm. Untuk memenuhi sasaran panjang *upset* minimal 4 mm maka Persamaan 4.2 dijadikan sebuah kendala (*goal constraint*) dengan memasukkan suatu variabel simpangan (*deviational variable*) dalam kendala tersebut, sehingga Persamaan 4.2 menjadi:

$$6,23 + 0,41V + 2,09F_1 + 1,06F_2 - 0,57V*V - 0,23F_1*F_1 - 0,07F_2*F_2 - 0,19V*F_1 + 0,19V*F_2 - 0,24F_1*F_2 + d_3^- - d_3^+ = 4 \quad (4.14)$$

Langkah selanjutnya adalah memasukkan batasan setiap faktor sebagaimana perhitungan prioritas sasaran pertama, yaitu Persamaan 4.5 sampai dengan 4.10. Selain batasan-batasan tersebut, dalam perhitungan ini juga dimasukkan Persamaan 4.4, 4.11, 4.12, dan 4.13 sebagai batasan yang memastikan sasaran prioritas-prioritas di atasnya tetap terpenuhi.

Setelah seluruh batasan atau kendala telah ditetapkan, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai variabel-variabel dari seluruh persamaan dengan menetapkan sebuah fungsi objektif, yaitu meminimalkan simpangan atau deviasi dari Persamaan 4.14 sedemikian hingga didapatkan nilai panjang *upset* minimal 4 mm. Dalam hal ini fungsi objektif yang ditetapkan adalah meminimalkan d_3^- .

Hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak mendapatkan seluruh nilai variabel persamaan, salah satunya adalah nilai dari d_3^- , sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 4.13. perhitungan optimasi kekuatan tarik secara lengkap dapat dilihat pada lampiran 5.

$$d_3^- = 0 \quad (4.15)$$

4.5.3 Perhitungan Sasaran Prioritas Ke Tiga

Sasaran prioritas ke tiga dari penelitian ini adalah hasil pengelasan memiliki kekerasan minimal sebesar 40 HRC. Untuk mendapatkan kekerasan minimal 40 HRC maka Persamaan 4.3 dijadikan sebuah kendala (*goal constraint*) dengan memasukkan suatu variabel simpangan (*deviational variable*) dalam kendala tersebut, sehingga Persamaan 4.3 menjadi:

$$40,62 + 0,86V + 2,42F_1 - 5,02F_2 - 1,84V*V - 1,32F_1*F_1 + 1,37F_2*F_2 + 0,27V*F_1 + 0,45V*F_2 - 2F_1*F_2 + d_4^- - d_4^+ = 40 \quad (4.16)$$

Langkah selanjutnya adalah memasukkan batasan setiap faktor sebagaimana perhitungan sasaran prioritas-prioritas pertama dan ke dua, yaitu Persamaan 4.5 sampai dengan 4.10. Selain batasan-batasan tersebut, dalam perhitungan ini juga dimasukkan Persamaan 4.4, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, dan 4.15 sebagai batasan yang memastikan sasaran prioritas-prioritas di atasnya tetap terpenuhi.

Setelah seluruh kendala telah ditetapkan, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai variabel-variabel dari seluruh persamaan dengan menetapkan sebuah fungsi objektif, yaitu meminimalkan simpangan atau deviasi dari Persamaan 4.16 sedemikian hingga didapatkan nilai kekerasan minimal 40 HRC. Dalam hal ini fungsi objektif yang ditetapkan adalah meminimalkan d_4^- .

Hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak mendapatkan seluruh nilai variabel persamaan. Sehingga diperoleh nilai faktor-faktor penelitian meliputi nilai V , F_1 , dan F_2 yang mampu menghasilkan respon kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan optimum. Nilai V , F_1 , dan F_2 berturut-turut ditampilkan pada Persamaan 4.17, 4.18, dan 4.19.

$$V_{\text{kode}} = 0 \quad (4.17)$$

$$F_{1\text{kode}} = 0,38 \quad (4.18)$$

$$F_{2\text{kode}} = 0 \quad (4.19)$$

Nilai tersebut adalah nilai faktor dalam bentuk variabel kode. Untuk mengetahui nilai faktor dalam bentuk variabel alami, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.1. Sehingga didapatkan nilai faktor V , F_1 , dan F_2 dalam bentuk variabel alami yang ditampilkan pada Persamaan 4.20, 4.21, dan 4.22

$$V = 1500 \text{ rpm} \quad (4.20)$$

$$F_1 = 5,8 \text{ kN} \quad (4.21)$$

$$F_2 = 10 \text{ kN} \quad (4.22)$$

4.5.4 Prediksi nilai Respon Optimum

Prediksi nilai respon optimum didapatkan dengan menyubstitusikan Persamaan 4.20, 4.21, dan 4.22 ke dalam Persamaan 4.1, 4.2, dan 4.3. Dari Persamaan 4.1 akan didapatkan prediksi nilai respon kekuatan tarik optimum, dari Persamaan 4.2 akan didapatkan prediksi nilai respon panjang *upset* optimum, sedangkan dari Persamaan 4.3 akan didapatkan prediksi nilai respon kekerasan optimum. Prediksi nilai respon optimum ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Prediksi Nilai Respon Optimum

Kekuatan Tarik	Panjang <i>Upset</i>	Kekerasan
122,3 kgf/mm ²	6,9 mm	40,3 HRC

Sumber: Hasil perhitungan

4.6 Pengujian Konfirmasi

Setelah diperoleh nilai faktor-faktor yang diduga mampu menghasilkan respon optimum, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian konfirmasi. Pengujian konfirmasi dilakukan dengan cara melakukan proses las gesek menggunakan pengaturan level faktor sesuai hasil perhitungan optimasi, yaitu V, F₁, dan F₂ dalam bentuk variabel alami, yaitu berturut-turut adalah sebesar 1500 rpm, 5,8 kN, dan 10 kN.

Respon yang didapatkan dari hasil pengujian konfirmasi akan dibandingkan dengan respon hasil prediksi nilai respon optimum. Kedua data tersebut dibandingkan dengan pengujian statistik Uji-t satu sampel. Pengujian ini menggunakan hipotesa H *null*, dimana hipotesa yang dibuat adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu_{\text{konfirmasi}} = \text{prediksi respon optimum}$$

$$H_1 : \mu_{\text{konfirmasi}} \neq \text{prediksi respon optimum}$$

Sedangkan kriteria penolakannya adalah sebagai berikut:

$$\text{Tolak } H_0 \text{ jika } P_{\text{value}} < \alpha$$

Penelitian ini menggunakan tingkat keyakinan 95%, sehingga level signifikansi (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05. Level signifikansi menunjukkan tingkat kesalahan yang dapat diterima.

Tabel 4.9 Data Pengujian Konfirmasi

No.	Kekuatan Tarik (Kgf/mm ²)	Panjang <i>Upset</i> (mm)	Kekerasan (HRC)
1	122,2	6,8	41,6
2	122,1	6,99	40,9
3	123,8	6,89	41,2
4	122,7	6,85	41,5
5	123,2	6,95	40,7
Rata-rata	122,8	6,9	41,2

Sumber: Hasil percobaan

Data hasil pengujian konfirmasi ditampilkan pada Tabel 4.9. Hasil Uji-t satu sampel untuk kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan menunjukkan nilai P_{value} lebih besar dari α , yaitu berturut-turut sebesar 0,191; 0,912; dan 0,523. Sehingga H_0 gagal ditolak. Artinya tidak ada perbedaan signifikan antara data hasil percobaan konfirmasi dengan prediksi nilai respon optimum.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 1

Data Pengujian Kekuatan Tarik

No. Perc.	Faktor			Respon Hasil Percobaan			
	RPM	F1	F2	n-1	n-2	n-3	Rata-rata Kekuatan tarik (mm)
1	0	0	0	124,3	124,2	124,1	124,2
2	0	0	0	123,2	123,3	123,1	123,2
3	0	0	0	123,6	123,9	123,8	123,8
4	-1	1	-1	122,7	122,7	122,9	122,8
5	0	0	0	124,4	124,3	124	124,2
6	0	0	0	123,5	123,1	123,1	123,2
7	0	-1,682	0	127,9	127,8	127,7	127,8
8	1	1	-1	119,2	118,5	119,8	119,2
9	-1	-1	-1	119,8	119,4	119,6	119,6
10	-1	-1	1	125,7	124,4	124,8	125,0
11	1	1	1	175,5	175,2	174,8	175,2
12	0	0	0	122,3	122,1	121,6	122,0
13	-1	1	1	117,4	117,3	117,5	117,4
14	0	0	-1,682	113,5	113,8	114	113,8
15	1	-1	-1	123,8	123,4	124,2	123,8
16	1	-1	1	188,7	188,6	188,4	188,6
17	0	1,682	0	118,4	118	118,2	118,2
18	0	0	1,682	162,2	162,7	162,9	162,6
19	1,682	0	0	170,4	170	169,7	170,0
20	-1,682	0	0	117,5	117,3	117,4	117,4

Lampiran 2

Data Pengujian Panjang *Upset*

No. Perc.	Faktor			Respon Hasil Percobaan			
	RPM	F1	F2	n-1	n-2	n-3	Rata-rata Panjang <i>upset</i> (mm)
1	0	0	0	6,17	6,13	6,13	6,14
2	0	0	0	6,3	6,33	6,3	6,31
3	0	0	0	6,28	6,35	6,31	6,31
4	-1	1	-1	6,6	6,65	6,61	6,62
5	0	0	0	6	6,05	6,1	6,05
6	0	0	0	6,09	6,03	4	5,37
7	0	-1,682	0	0,35	0,32	0,37	0,35
8	1	1	-1	6,62	6,58	6,6	6,60
9	-1	-1	-1	1,54	1,54	1,52	1,53
10	-1	-1	1	3,8	3,83	3,82	3,82
11	1	1	1	8,14	8,2	8,15	8,16
12	0	0	0	6,31	6,31	6,32	6,31
13	-1	1	1	7,86	7,84	7,8	7,83
14	0	0	-1,682	4,23	4,26	4,25	4,25
15	1	-1	-1	2,4	2,41	2,37	2,39
16	1	-1	1	5,3	5,31	5,34	5,32
17	0	1,682	0	9,1	9,05	9,16	9,10
18	0	0	1,682	7,85	7,81	7,83	7,83
19	1,682	0	0	5,34	5,38	5,38	5,37
20	-1,682	0	0	3,9	3,91	3,86	3,89

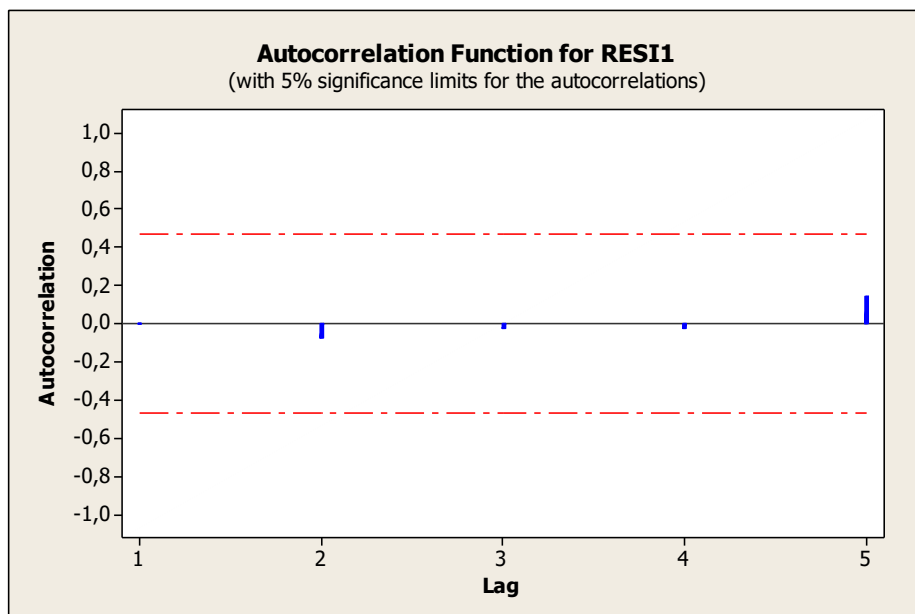
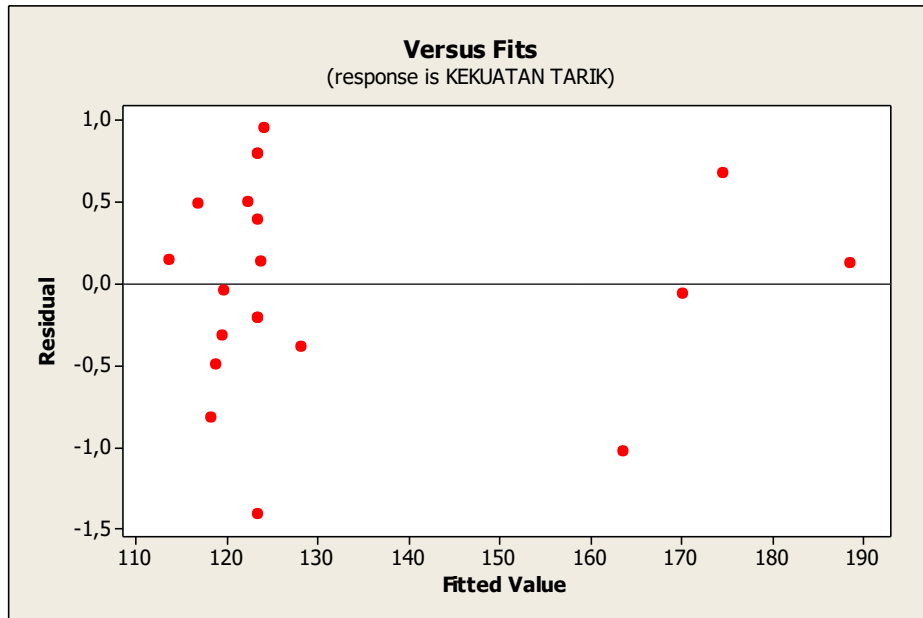
Lampiran 3

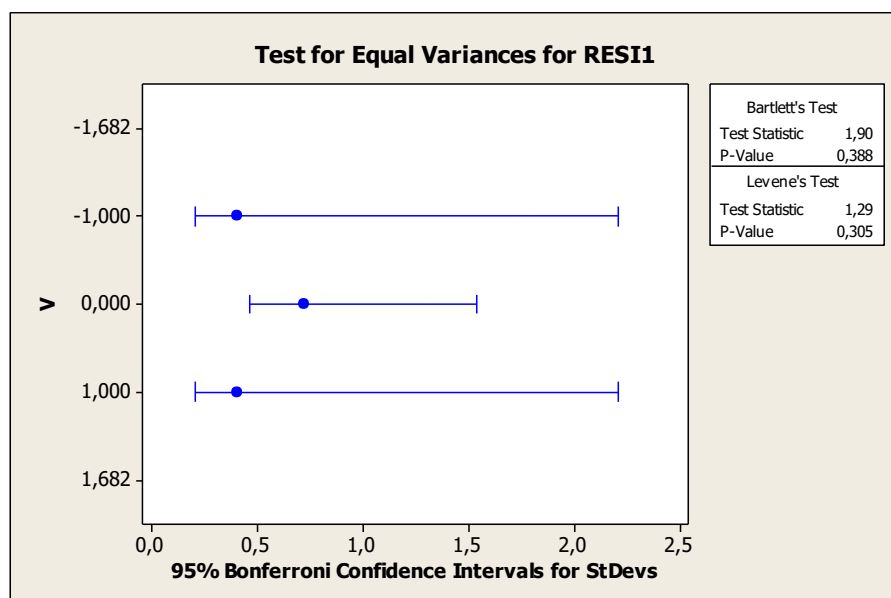
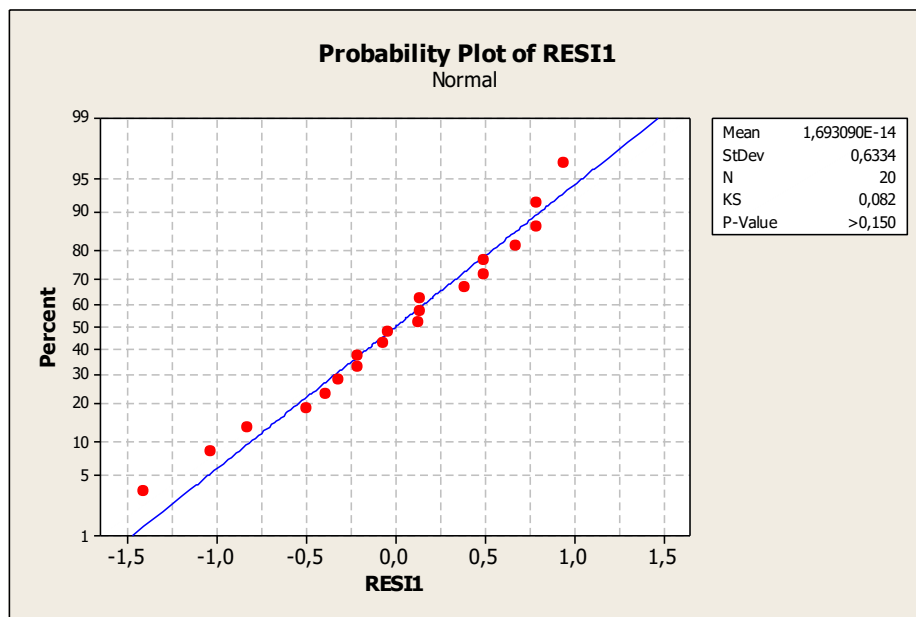
Data Pengujian Kekerasan

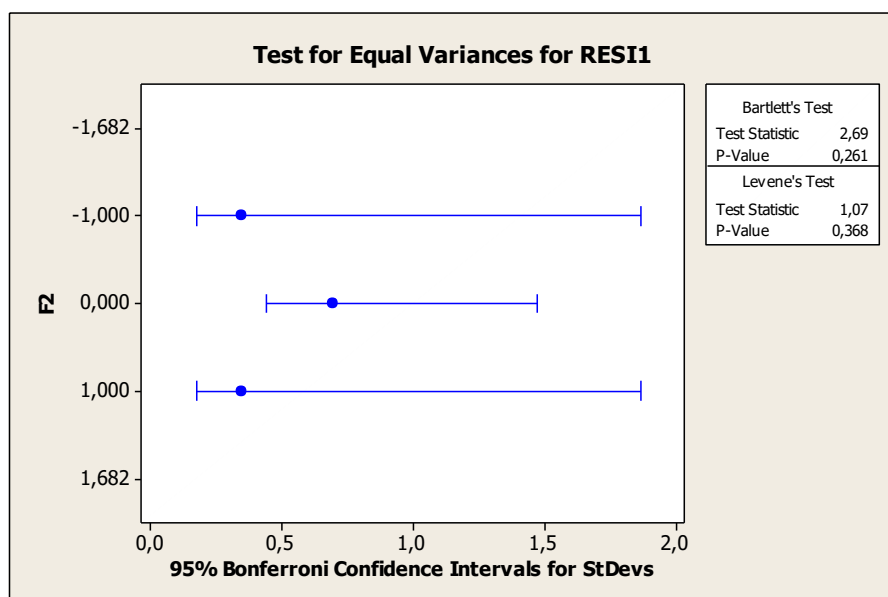
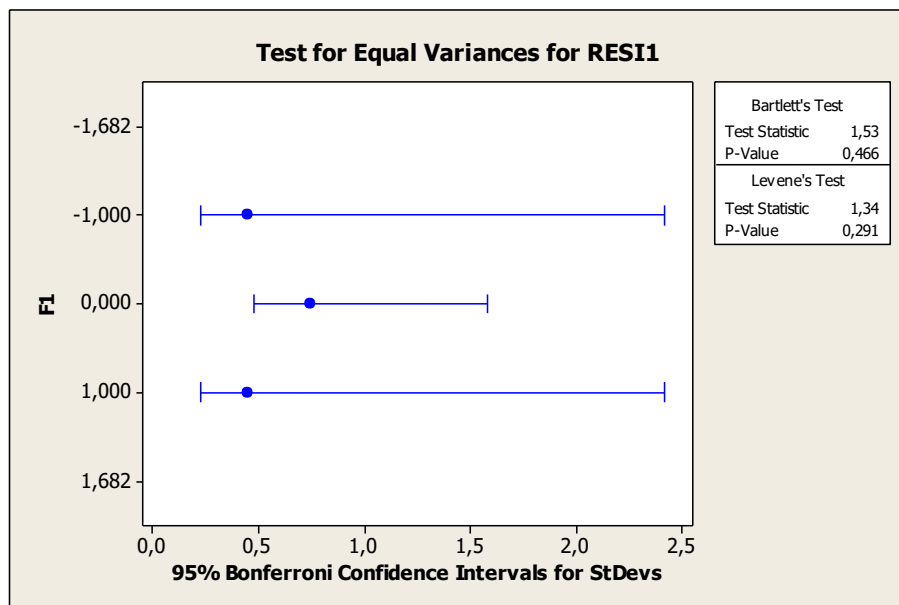
No. Perc.	Faktor			Respon Hasil Percobaan			
	RPM	F1	F2	n-1	n-2	n-3	Rata-rata Kekerasan (mm)
1	0	0	0	40,7	40,5	40,4	40,5
2	0	0	0	40,7	40,9	40,6	40,7
3	0	0	0	40,7	40,8	40,9	40,8
4	-1	1	-1	47,8	47,4	47,4	47,5
5	0	0	0	40,3	40,4	40,7	40,5
6	0	0	0	40,6	40,8	40,5	40,6
7	0	-1,682	0	32,3	32,1	31,7	32,0
8	1	1	-1	49,1	48,8	49	49,0
9	-1	-1	-1	39,3	39,7	39	39,3
10	-1	-1	1	32,5	32,1	32,2	32,3
11	1	1	1	35,9	36	35,6	35,8
12	0	0	0	40,6	40,7	40,6	40,6
13	-1	1	1	32,4	32,8	33	32,7
14	0	0	-1,682	53,1	52,8	53	53,0
15	1	-1	-1	39,4	39,5	39,7	39,5
16	1	-1	1	34,4	34,7	34,5	34,5
17	0	1,682	0	42	41,8	41,8	41,9
18	0	0	1,682	35,7	36	36,4	36,0
19	1,682	0	0	36,7	36,7	36,9	36,8
20	-1,682	0	0	34	33,9	34	34,0

Lampiran 4

Uji Residual Kekuatan Tarik

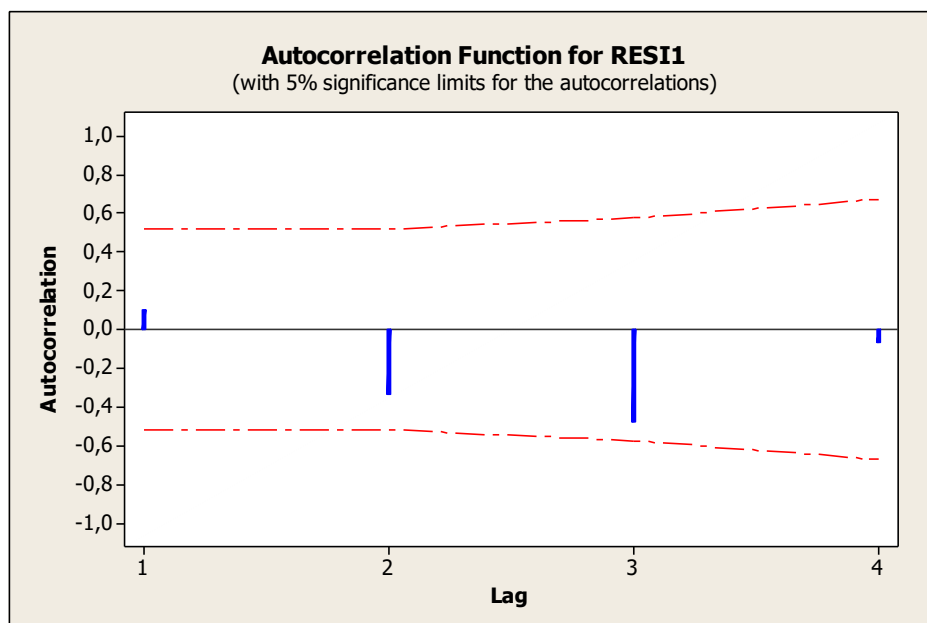
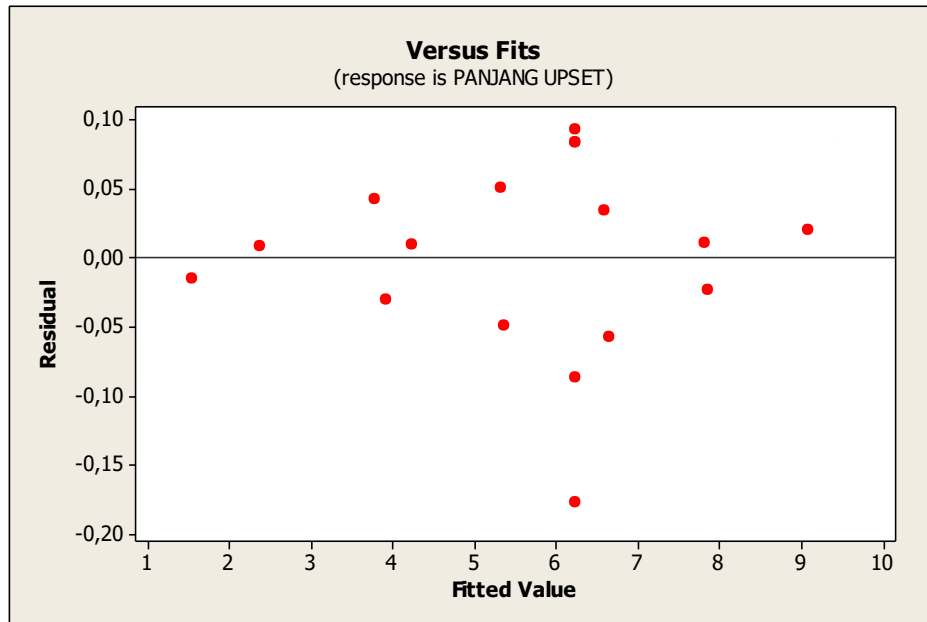


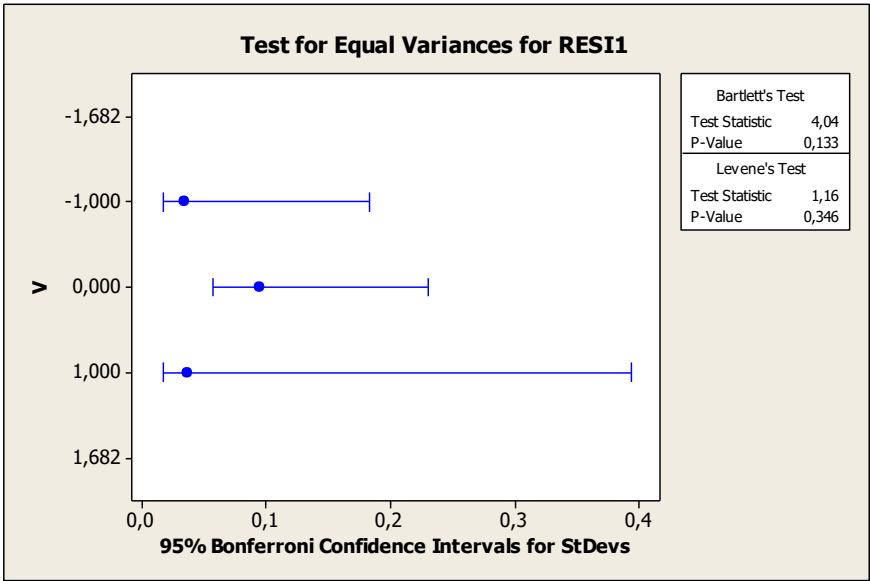
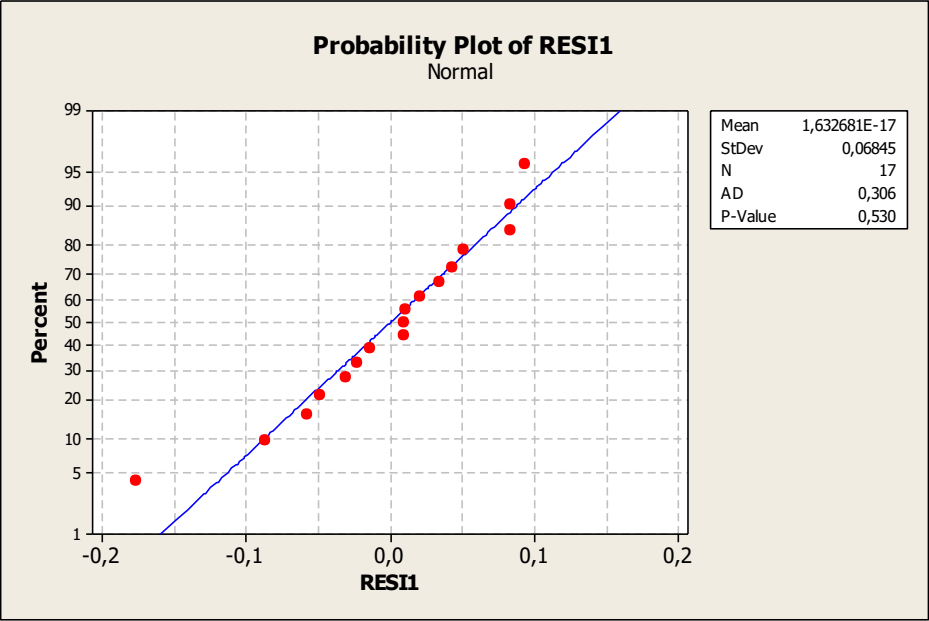


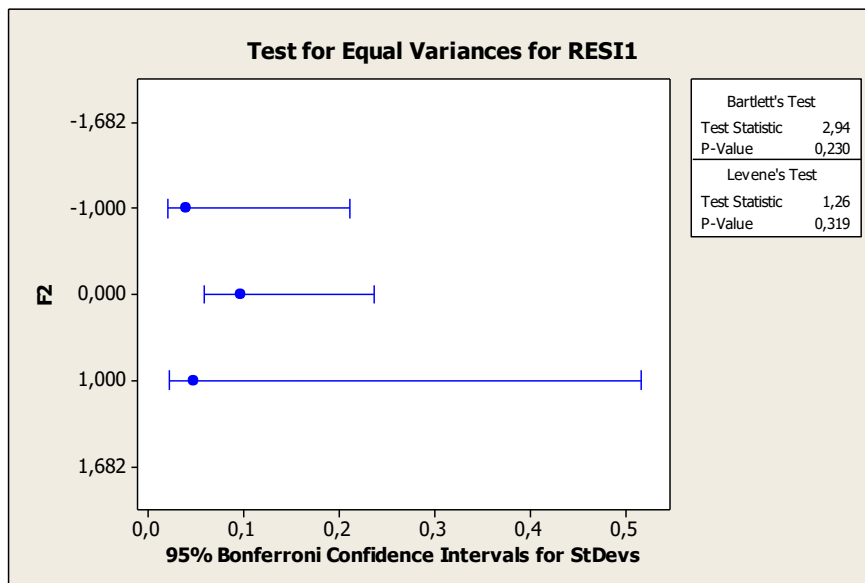
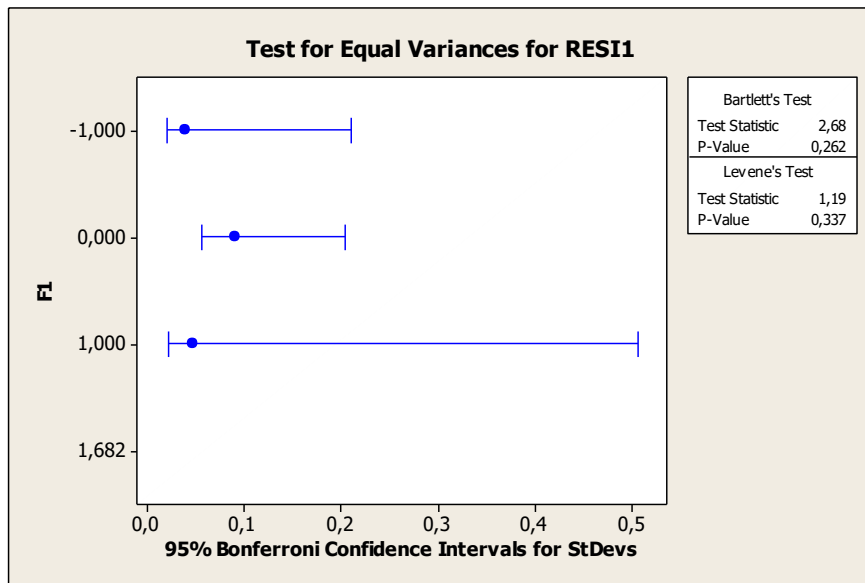


Lampiran 5

Uji Residual Panjang Upset

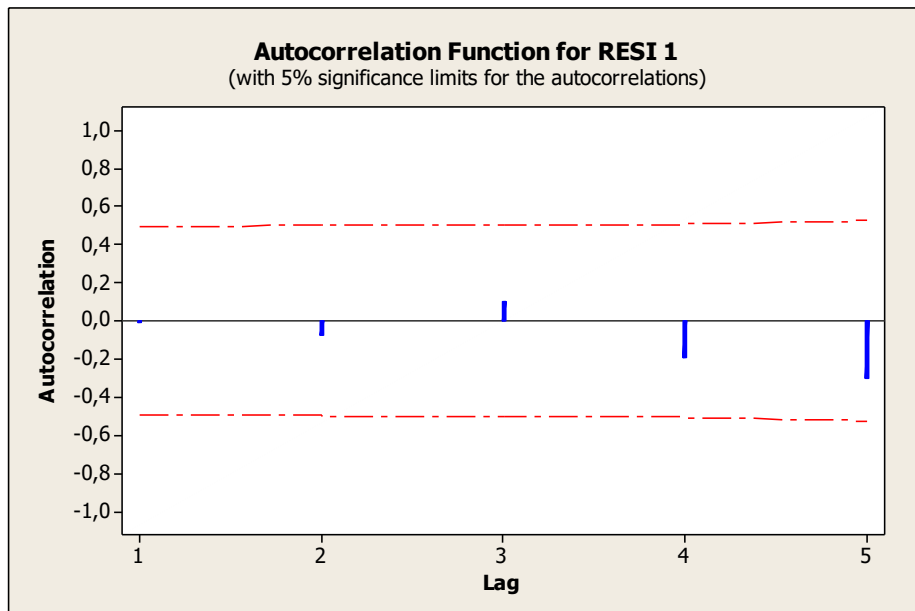
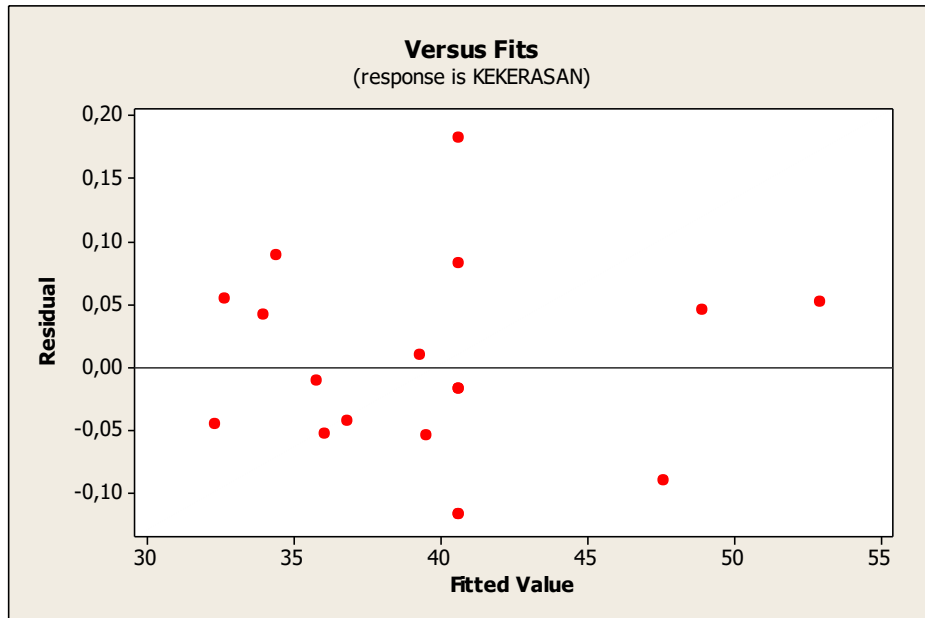


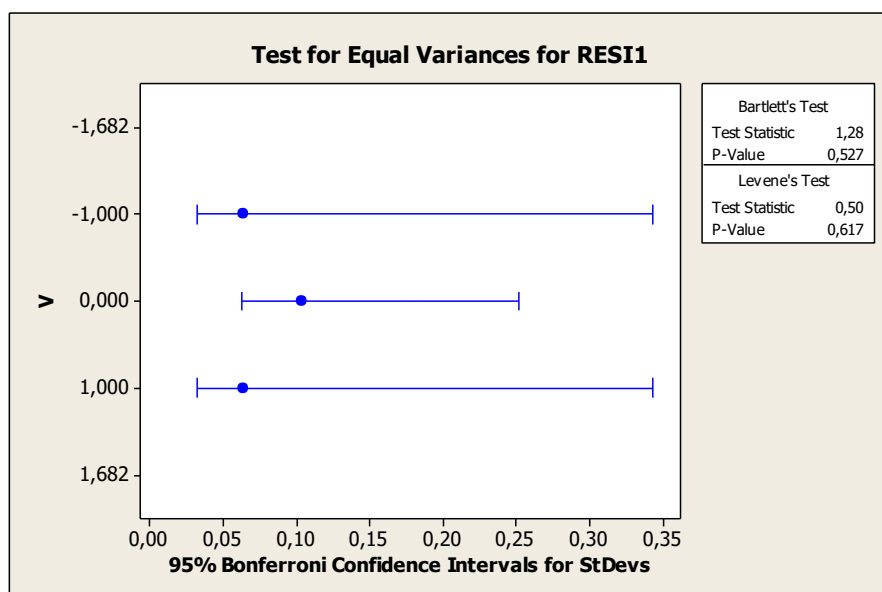
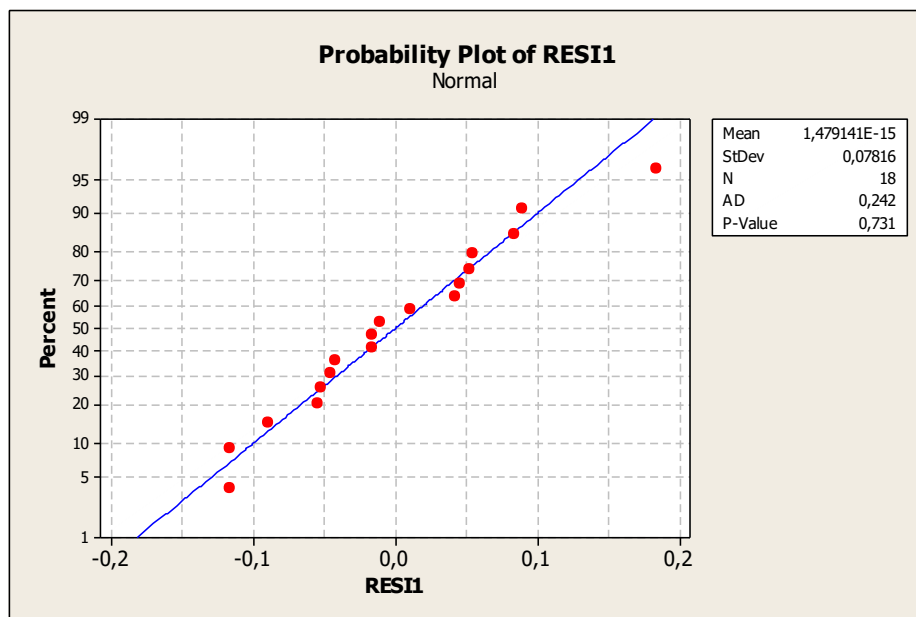


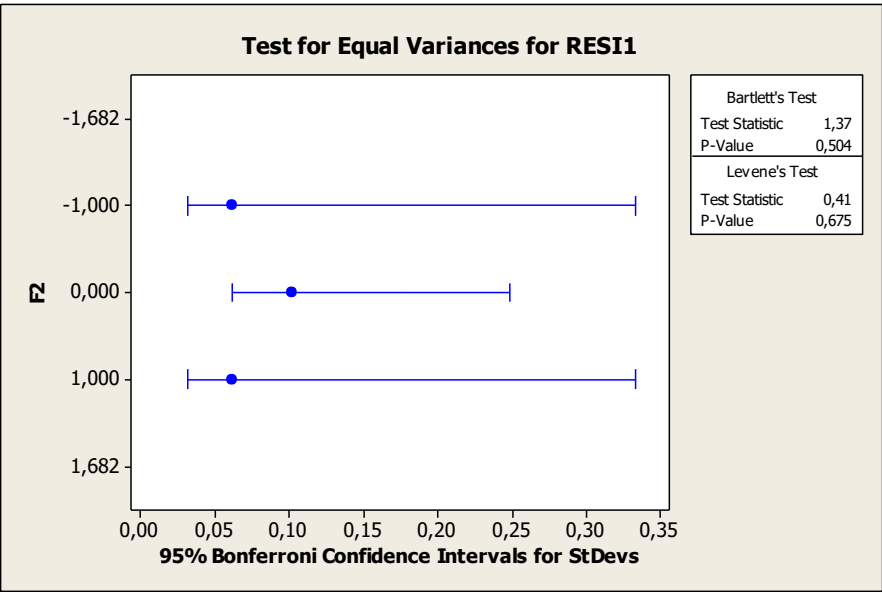
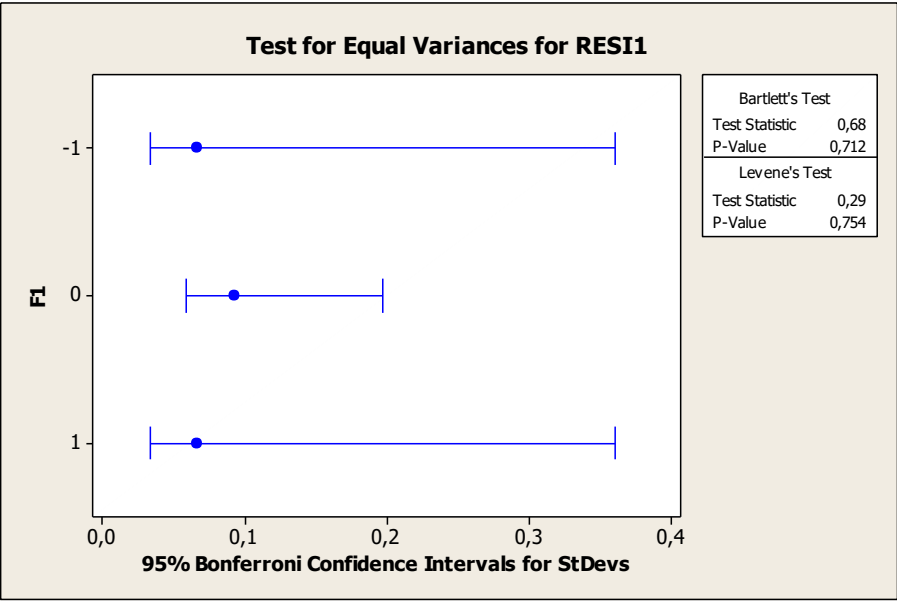


Lampiran 6

Uji Residual Kekerasan







Lampiran 7

Perhitungan *Goal Programming* Kekuatan Tarik $\geq 90 \text{ kgf/mm}^2$

MODEL:

```
min = d1min;  
123.41 + 15.41*V - 2.82*F1 + 14.85*F2 - 1.7*V*F1 + 15.1*V*F2 - 2.45*F1*F2 + 7.33*V*V +  
5.38*F2*F2 + d1min - d1plus = 90;  
V>-2;  
F1>-2;  
F2>-2;  
V<2;  
F1<2;  
F2<2;
```

SOLUSI:

```
Local optimal solution found.  
Objective value: 0.000000  
Infeasibilities: 0.000000  
Extended solver steps: 0  
Total solver iterations: 10  
  
Model Class: NLP  
  
Total variables: 5  
Nonlinear variables: 3  
Integer variables: 0  
  
Total constraints: 8  
Nonlinear constraints: 1  
  
Total nonzeros: 12  
Nonlinear nonzeros: 3
```

Variable	Value	Reduced Cost
D1MIN	0.000000	1.000000
V	0.000000	0.000000
F1	2.000000	0.000000
F2	0.000000	0.000000
D1PLUS	27.81000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.000000	-1.000000
2	0.000000	0.000000
3	2.000000	0.000000
4	4.000000	0.000000
5	2.000000	0.000000
6	2.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000
8	2.000000	0.000000

Lampiran 8

Perhitungan Goal Programming Panjang Upset ≤ 7 mm

MODEL:

```
min = d2plus;  
123.41 + 15.41*V - 2.82*F1 + 14.85*F2 - 1.7*V*F1 + 15.1*V*F2 - 2.45*F1*F2 + 7.33*V*V +  
5.38*F2*F2 + d1min - d1plus = 90;  
6.23 + 0.41*V + 2.09*F1 + 1.06*F2 - 0.57*V*V - 0.23*F1*F1 - 0.07*F2*F2 - 0.19*V*F1 +  
0.19*V*F2 - 0.24*F1*F2 + d2min - d2plus = 7;  
d1min = 0;  
V > -2;  
F1 > -2;  
F2 > -2;  
V < 2;  
F1 < 2;  
F2 < 2;
```

SOLUSI:

```
Local optimal solution found.  
Objective value: 0.000000  
Infeasibilities: 0.3488793E-07  
Total solver iterations: 15
```

```
Model Class: NLP
```

```
Total variables: 6  
Nonlinear variables: 3  
Integer variables: 0
```

```
Total constraints: 9  
Nonlinear constraints: 2
```

```
Total nonzeros: 16  
Nonlinear nonzeros: 6
```

Variable	Value	Reduced Cost
D2PLUS	0.000000	1.000000
V	0.000000	0.000000
F1	0.3847082	0.000000
F2	0.000000	0.000000
D1MIN	0.000000	0.000000
D1PLUS	32.32660	0.000000
D2MIN	0.000000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.000000	-1.000000
2	-0.1516867E-08	0.000000
3	-0.3488793E-07	0.000000
4	0.000000	0.000000
5	2.000000	0.000000
6	2.384708	0.000000
7	2.000000	0.000000
8	2.000000	0.000000
9	1.615292	0.000000
10	2.000000	0.000000

Lampiran 9

Perhitungan Goal Programming Panjang Upset ≥ 4 mm

MODEL:

```
min = d3min;  
123.41 + 15.41*V - 2.82*F1 + 14.85*F2 - 1.7*V*F1 + 15.1*V*F2 - 2.45*F1*F2 + 7.33*V*V +  
5.38*F2*F2 + d1min - d1plus = 90;  
6.23 + 0.41*V + 2.09*F1 + 1.06*F2 - 0.57*V*V - 0.23*F1*F1 - 0.07*F2*F2 - 0.19*V*F1 +  
0.19*V*F2 - 0.24*F1*F2 + d2min - d2plus = 7;  
6.23 + 0.41*V + 2.09*F1 + 1.06*F2 - 0.57*V*V - 0.23*F1*F1 - 0.07*F2*F2 - 0.19*V*F1 +  
0.19*V*F2 - 0.24*F1*F2 + d3min - d3plus = 4;  
d1min = 0;  
d2plus = 0;  
V > -2;  
F1 > -2;  
F2 > -2;  
V < 2;  
F1 < 2;  
F2 < 2;
```

SOLUSI:

```
Local optimal solution found.  
Objective value: 0.000000  
Infeasibilities: 0.3149879E-08  
Total solver iterations: 9
```

```
Model Class: NLP
```

```
Total variables: 7  
Nonlinear variables: 3  
Integer variables: 0
```

```
Total constraints: 10  
Nonlinear constraints: 3
```

```
Total nonzeros: 20  
Nonlinear nonzeros: 9
```

Variable	Value	Reduced Cost
D3MIN	0.000000	1.000000
V	0.000000	0.000000
F1	0.3847082	0.000000
F2	0.000000	0.000000
D1MIN	0.000000	0.000000
1PLUS	32.32660	0.000000
D2MIN	0.000000	0.000000
2PLUS	0.000000	0.000000
3PLUS	3.000000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.000000	-1.000000
2	0.000000	0.000000
3	-0.3149879E-08	0.000000
4	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000
7	2.000000	0.000000
8	2.384708	0.000000
9	2.000000	0.000000
10	2.000000	0.000000
11	1.615292	0.000000
12	2.000000	0.000000

Lampiran 10

Perhitungan *Goal Programming* Kekerasan ≥ 40 HRC

MODEL:

min = d4min;

$123.41 + 15.41*V - 2.82*F1 + 14.85*F2 - 1.7*V*F1 + 15.1*V*F2 - 2.45*F1*F2 + 7.33*V*V + 5.38*F2*F2 + d1min - d1plus = 90;$

$6.23 + 0.41*V + 2.09*F1 + 1.06*F2 - 0.57*V*V - 0.23*F1*F1 - 0.07*F2*F2 - 0.19*V*F1 + 0.19*V*F2 - 0.24*F1*F2 + d2min - d2plus = 7;$

$6.23 + 0.41*V + 2.09*F1 + 1.06*F2 - 0.57*V*V - 0.23*F1*F1 - 0.07*F2*F2 - 0.19*V*F1 + 0.19*V*F2 - 0.24*F1*F2 + d3min - d3plus = 4;$

$40.62 + 0.86*V + 2.42*F1 - 5.02*F2 + 0.27*V*F1 + 0.45*V*F2 - 2*F1*F2 - 1.84*V*V -$

$1.32*F1*F1 + 1.37*F2*F2 + d4min - d4plus = 40;$

d1min = 0;

d2plus = 0;

d3min = 0;

V > -2;

F1 > -2;

F2 > -2;

V < 2;

F1 < 2;

F2 < 2;

SOLUSI:

Local optimal solution found.

Objective value:

0.000000

Infeasibilities:

0.1771696E-06

Total solver iterations:

12

Model Class:

NLP

Total variables:

8

Nonlinear variables:

3

Integer variables:

0

Total constraints:

11

Nonlinear constraints:

4

Total nonzeros:

24

Nonlinear nonzeros:

12

Variable	Value	Reduced Cost
D4MIN	0.000000	1.000000
V	0.000000	0.000000
F1	0.3847082	0.000000
F2	0.000000	0.000000
D1MIN	0.000000	0.000000
D1PLUS	32.32660	0.000000
D2MIN	0.000000	0.000000
D2PLUS	0.000000	0.000000
D3MIN	0.000000	0.000000
D3PLUS	3.000000	0.000000
D4PLUS	1.355633	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.000000	-1.000000
2	-0.1771696E-06	0.000000
3	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000
5	-0.4511556E-07	0.000000
6	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000
9	2.000000	0.000000
10	2.384708	0.000000
11	2.000000	0.000000
12	2.000000	0.000000
13	1.615292	0.000000
14	2.000000	0.000000

Lampiran 11

Uji-T Satu Sampel Pengujian Konfirmasi

One-Sample T: Kekuatan tarik

Test of mu = 122,3 vs not = 122,3

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Kekuatan tarik	5	122,800	0,711	0,318	(121,918; 123,682)	1,57	0,191

One-Sample T: Panjang Upset

Test of mu = 6,9 vs not = 6,9

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Panjang Upset	5	6,8960	0,0760	0,0340	(6,8016; 6,9904)	-0,12	0,912

One-Sample T: Kekerasan

Test of mu = 41,3 vs not = 41,3

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Kekerasan	5	41,180	0,383	0,171	(40,704; 41,656)	-0,70	0,523

Lampiran 12

Regresi *Response Surface* Kekuatan Tarik

Response Surface Regression: KEKUATAN TARIK versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for KEKUATAN TARIK

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	123,408	0,3561	346,590	0,000
V	15,410	0,2362	65,234	0,000
F1	-2,822	0,2362	-11,947	0,000
F2	14,854	0,2362	62,881	0,000
V*V	7,330	0,2299	31,877	0,000
F1*F1	0,013	0,2299	0,056	0,957
F2*F2	5,385	0,2299	23,422	0,000
V*F1	-1,700	0,3087	-5,508	0,000
V*F2	15,100	0,3087	48,921	0,000
F1*F2	-2,450	0,3087	-7,938	0,000

S = 0,873023 PRESS = 37,1999
R-Sq = 99,92% R-Sq(pred) = 99,60% R-Sq(adj) = 99,85%

Analysis of Variance for KEKUATAN TARIK

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	9370,26	9370,26	1041,14	1366,02	0,000
Linear	3	6365,81	6365,81	2121,94	2784,07	0,000
V	1	3243,39	3243,39	3243,39	4255,46	0,000
F1	1	108,79	108,79	108,79	142,74	0,000
F2	1	3013,63	3013,63	3013,63	3954,02	0,000
Square	3	1109,23	1109,23	369,74	485,12	0,000
V*V	1	687,12	774,49	774,49	1016,16	0,000
F1*F1	1	3,98	0,00	0,00	0,00	0,957
F2*F2	1	418,13	418,13	418,13	548,60	0,000
Interaction	3	1895,22	1895,22	631,74	828,87	0,000
V*F1	1	23,12	23,12	23,12	30,33	0,000
V*F2	1	1824,08	1824,08	1824,08	2393,27	0,000
F1*F2	1	48,02	48,02	48,02	63,00	0,000
Residual Error	10	7,62	7,62	0,76		
Lack-of-Fit	5	4,15	4,15	0,83	1,19	0,425
Pure Error	5	3,47	3,47	0,69		
Total	19	9377,88				

Estimated Regression Coefficients for KEKUATAN TARIK using data in
uncoded
units

Term	Coef
Constant	123,408
V	9,16169
F1	-1,67792
F2	8,83124
V*V	2,59074
F1*F1	0,00451881
F2*F2	1,90358
V*F1	-0,600893
V*F2	5,33734
F1*F2	-0,865992

Predicted Response for New Design Points Using Model for KEKUATAN TARIK

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	123,408	0,356064	(122,615; 124,201)	(121,307; 125,509)
2	123,408	0,356064	(122,615; 124,201)	(121,307; 125,509)
3	123,408	0,356064	(122,615; 124,201)	(121,307; 125,509)
4	122,299	0,714456	(120,708; 123,891)	(119,786; 124,813)
5	123,408	0,356064	(122,615; 124,201)	(121,307; 125,509)
6	123,408	0,356064	(122,615; 124,201)	(121,307; 125,509)
7	128,191	0,680371	(126,675; 129,707)	(125,725; 130,657)
8	119,519	0,714456	(117,927; 121,111)	(117,006; 122,033)
9	119,644	0,714456	(118,052; 121,236)	(117,130; 122,158)
10	124,052	0,714456	(122,460; 125,644)	(121,539; 126,566)
11	174,528	0,714456	(172,936; 176,120)	(172,014; 177,041)
12	123,408	0,356064	(122,615; 124,201)	(121,307; 125,509)
13	116,908	0,714456	(115,316; 118,500)	(114,394; 119,421)
14	113,660	0,680371	(112,144; 115,175)	(111,193; 116,126)
15	123,664	0,714456	(122,072; 125,256)	(121,150; 126,177)
16	188,472	0,714456	(186,880; 190,064)	(185,959; 190,986)
17	118,697	0,680371	(117,181; 120,213)	(116,231; 121,163)
18	163,629	0,680371	(162,113; 165,145)	(161,163; 166,095)
19	170,064	0,680371	(168,548; 171,580)	(167,598; 172,530)
20	118,225	0,680371	(116,709; 119,741)	(115,758; 120,691)

Lampiran 13

Regresi *Response Surface Panjang Upset*

Response Surface Regression: PANJANG UPSET versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,07659	0,1823	33,331	0,000
V	0,37775	0,1210	3,123	0,011
F1	2,25999	0,1210	18,685	0,000
F2	1,02587	0,1210	8,482	0,000
V*V	-0,46950	0,1177	-3,988	0,003
F1*F1	-0,43592	0,1177	-3,703	0,004
F2*F2	0,02889	0,1177	0,245	0,811
V*F1	-0,25625	0,1580	-1,621	0,136
V*F2	0,12375	0,1580	0,783	0,452
F1*F2	-0,30625	0,1580	-1,938	0,081

S = 0,447008 PRESS = 11,0518
R-Sq = 97,90% R-Sq(pred) = 88,37% R-Sq(adj) = 96,01%

Analysis of Variance for PANJANG UPSET

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	93,0454	93,0454	10,3384	51,74	0,000
Linear	3	86,0832	86,0832	28,6944	143,60	0,000
V	1	1,9489	1,9489	1,9489	9,75	0,011
F1	1	69,7602	69,7602	69,7602	349,12	0,000
F2	1	14,3740	14,3740	14,3740	71,94	0,000
Square	3	5,5640	5,5640	1,8547	9,28	0,003
V*V	1	2,7486	3,1778	3,1778	15,90	0,003
F1*F1	1	2,8034	2,7395	2,7395	13,71	0,004
F2*F2	1	0,0120	0,0120	0,0120	0,06	0,811
Interaction	3	1,3981	1,3981	0,4660	2,33	0,136
V*F1	1	0,5253	0,5253	0,5253	2,63	0,136
V*F2	1	0,1225	0,1225	0,1225	0,61	0,452
F1*F2	1	0,7503	0,7503	0,7503	3,76	0,081
Residual Error	10	1,9982	1,9982	0,1998		
Lack-of-Fit	5	1,3262	1,3262	0,2652	1,97	0,237
Pure Error	5	0,6719	0,6719	0,1344		
Total	19	95,0435				

Unusual Observations for PANJANG UPSET

Obs	StdOrder	PANJANG UPSET	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	7	0,350	1,042	0,348	-0,692	-2,47 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	6,07659
V	0,224582
F1	1,34363
F2	0,609910
V*V	-0,165952
F1*F1	-0,154083
F2*F2	0,0102110
V*F1	-0,0905757
V*F2	0,0437415
F1*F2	-0,108249

Predicted Response for New Design Points Using Model for PANJANG UPSET

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	6,07659	0,182313	(5,67038; 6,48281)	(5,00095; 7,15224)
2	6,07659	0,182313	(5,67038; 6,48281)	(5,00095; 7,15224)
3	6,07659	0,182313	(5,67038; 6,48281)	(5,00095; 7,15224)
4	6,74269	0,365818	(5,92759; 7,55778)	(5,45568; 8,02969)
5	6,07659	0,182313	(5,67038; 6,48281)	(5,00095; 7,15224)
6	6,07659	0,182313	(5,67038; 6,48281)	(5,00095; 7,15224)
7	1,04202	0,348365	(0,26581; 1,81823)	(-0,22072; 2,30476)
8	6,73818	0,365818	(5,92309; 7,55327)	(5,45118; 8,02519)
9	1,09771	0,365818	(0,28262; 1,91280)	(-0,18930; 2,38471)
10	3,51444	0,365818	(2,69935; 4,32954)	(2,22744; 4,80145)
11	8,42492	0,365818	(7,60982; 9,24001)	(7,13791; 9,71192)
12	6,07659	0,182313	(5,67038; 6,48281)	(5,00095; 7,15224)
13	7,93442	0,365818	(7,11933; 8,74952)	(6,64742; 9,22143)
14	4,43281	0,348365	(3,65661; 5,20902)	(3,17008; 5,69555)
15	2,11820	0,365818	(1,30311; 2,93329)	(0,83120; 3,40521)
16	5,02994	0,365818	(4,21485; 5,84503)	(3,74293; 6,31694)
17	8,64462	0,348365	(7,86842; 9,42083)	(7,38189; 9,90736)
18	7,88383	0,348365	(7,10763; 8,66004)	(6,62110; 9,14657)
19	5,38369	0,348365	(4,60749; 6,15990)	(4,12096; 6,64643)
20	4,11295	0,348365	(3,33675; 4,88916)	(2,85022; 5,37569)

Response Surface Regression: PANJANG UPSET versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,08661	0,11998	50,729	0,000
V	0,37775	0,07958	4,747	0,001
F1	2,04295	0,09836	20,770	0,000
F2	1,02587	0,07958	12,891	0,000
V*V	-0,53520	0,07941	-6,740	0,000
F1*F1	-0,19014	0,10141	-1,875	0,094
F2*F2	-0,03682	0,07941	-0,464	0,654
V*F1	-0,25625	0,10398	-2,464	0,036
V*F2	0,12375	0,10398	1,190	0,264
F1*F2	-0,30625	0,10398	-2,945	0,016

S = 0,294112 PRESS = 2,06172
R-Sq = 98,84% R-Sq(pred) = 96,94% R-Sq(adj) = 97,69%

Analysis of Variance for PANJANG UPSET

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	66,5846	66,5846	7,3983	85,53	0,000
Linear	3	60,7722	53,6409	17,8803	206,70	0,000
V	1	1,9489	1,9489	1,9489	22,53	0,001
F1	1	44,4492	37,3180	37,3180	431,41	0,000
F2	1	14,3740	14,3740	14,3740	166,17	0,000
Square	3	4,4143	4,4143	1,4714	17,01	0,000
V*V	1	4,0798	3,9290	3,9290	45,42	0,000
F1*F1	1	0,3159	0,3041	0,3041	3,52	0,094
F2*F2	1	0,0186	0,0186	0,0186	0,21	0,654
Interaction	3	1,3981	1,3981	0,4660	5,39	0,021
V*F1	1	0,5253	0,5253	0,5253	6,07	0,036
V*F2	1	0,1225	0,1225	0,1225	1,42	0,264
F1*F2	1	0,7503	0,7503	0,7503	8,67	0,016
Residual Error	9	0,7785	0,7785	0,0865		
Lack-of-Fit	4	0,1066	0,1066	0,0266	0,20	0,929
Pure Error	5	0,6719	0,6719	0,1344		
Total	18	67,3631				

Unusual Observations for PANJANG UPSET

PANJANG						
Obs	StdOrder	UPSET	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
6	6	5,370	6,087	0,120	-0,717	-2,67 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	6,08661
V	0,224582
F1	1,21459
F2	0,609910
V*V	-0,189176
F1*F1	-0,0672090
F2*F2	-0,0130130
V*F1	-0,0905757
V*F2	0,0437415
F1*F2	-0,108249

Predicted Response for New Design Points Using Model for PANJANG UPSET

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	6,08661	0,119984	(5,81519; 6,35803)	(5,36805; 6,80517)
2	6,08661	0,119984	(5,81519; 6,35803)	(5,36805; 6,80517)
3	6,08661	0,119984	(5,81519; 6,35803)	(5,36805; 6,80517)
4	6,65003	0,241954	(6,10269; 7,19737)	(5,78850; 7,51157)
5	6,08661	0,119984	(5,81519; 6,35803)	(5,36805; 6,80517)
6	6,08661	0,119984	(5,81519; 6,35803)	(5,36805; 6,80517)
7	6,64553	0,241954	(6,09819; 7,19287)	(5,78399; 7,50706)
8	1,43914	0,257295	(0,85709; 2,02118)	(0,55515; 2,32313)
9	3,85587	0,257295	(3,27383; 4,43792)	(2,97189; 4,73986)
10	8,33226	0,241954	(7,78492; 8,87960)	(7,47073; 9,19380)
11	6,08661	0,119984	(5,81519; 6,35803)	(5,36805; 6,80517)
12	7,84177	0,241954	(7,29443; 8,38911)	(6,98023; 8,70330)
13	4,25695	0,233946	(3,72772; 4,78617)	(3,40681; 5,10709)
14	2,45963	0,257295	(1,87759; 3,04167)	(1,57564; 3,34362)
15	5,37137	0,257295	(4,78932; 5,95341)	(4,48738; 6,25536)
16	8,98491	0,246475	(8,42735; 9,54248)	(8,11684; 9,85298)
17	7,70797	0,233946	(7,17874; 8,23719)	(6,85783; 8,55811)
18	5,20783	0,233946	(4,67860; 5,73705)	(4,35769; 6,05797)
19	3,93709	0,233946	(3,40786; 4,46631)	(3,08695; 4,78723)

Response Surface Regression: PANJANG UPSET versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,22968	0,06367	97,837	0,000
V	0,37775	0,03856	9,796	0,000
F1	2,04141	0,04766	42,835	0,000
F2	1,02587	0,03856	26,605	0,000
V*V	-0,58449	0,03950	-14,796	0,000
F1*F1	-0,23723	0,04987	-4,756	0,001
F2*F2	-0,08610	0,03950	-2,179	0,061
V*F1	-0,25625	0,05038	-5,086	0,001
V*F2	0,12375	0,05038	2,456	0,040
F1*F2	-0,30625	0,05038	-6,078	0,000

S = 0,142504 PRESS = 1,13803
R-Sq = 99,76% R-Sq(pred) = 98,31% R-Sq(adj) = 99,49%

Analysis of Variance for PANJANG UPSET

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	67,0499	67,0499	7,4500	366,86	0,000
Linear	3	60,6625	53,5837	17,8612	879,54	0,000
V	1	1,9489	1,9489	1,9489	95,97	0,000
F1	1	44,3396	37,2607	37,2607	1834,83	0,000
F2	1	14,3740	14,3740	14,3740	707,82	0,000
Square	3	4,9892	4,9892	1,6631	81,90	0,000
V*V	1	4,4218	4,4455	4,4455	218,91	0,000
F1*F1	1	0,4710	0,4594	0,4594	22,62	0,001
F2*F2	1	0,0965	0,0965	0,0965	4,75	0,061
Interaction	3	1,3981	1,3981	0,4660	22,95	0,000
V*F1	1	0,5253	0,5253	0,5253	25,87	0,001
V*F2	1	0,1225	0,1225	0,1225	6,03	0,040
F1*F2	1	0,7503	0,7503	0,7503	36,95	0,000
Residual Error	8	0,1625	0,1625	0,0203		
Lack-of-Fit	4	0,1011	0,1011	0,0253	1,65	0,320
Pure Error	4	0,0613	0,0613	0,0153		
Total	17	67,2124				

Unusual Observations for PANJANG UPSET

PANJANG						
Obs	StdOrder	UPSET	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	11	8,160	8,328	0,117	-0,168	-2,08 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	6,22968
V	0,224582
F1	1,21368
F2	0,609910
V*V	-0,206596
F1*F1	-0,0838517
F2*F2	-0,0304330
V*F1	-0,0905757
V*F2	0,0437415
F1*F2	-0,108249

Predicted Response for New Design Points Using Model for PANJANG UPSET

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	6,22968	0,063674	(6,08285; 6,37652)	(5,86976; 6,58961)
2	6,22968	0,063674	(6,08285; 6,37652)	(5,86976; 6,58961)
3	6,22968	0,063674	(6,08285; 6,37652)	(5,86976; 6,58961)
4	6,64592	0,117235	(6,37558; 6,91627)	(6,22039; 7,07145)
5	6,22968	0,063674	(6,08285; 6,37652)	(5,86976; 6,58961)
6	6,64142	0,117235	(6,37107; 6,91176)	(6,21589; 7,06694)
7	1,43809	0,124666	(1,15061; 1,72557)	(1,00148; 1,87471)
8	3,85483	0,124666	(3,56735; 4,14231)	(3,41821; 4,29144)
9	8,32815	0,117235	(8,05781; 8,59850)	(7,90262; 8,75368)
10	6,22968	0,063674	(6,08285; 6,37652)	(5,86976; 6,58961)
11	7,83766	0,117235	(7,56731; 8,10800)	(7,41213; 8,26319)
12	4,26059	0,113354	(3,99919; 4,52199)	(3,84069; 4,68049)
13	2,45859	0,124666	(2,17111; 2,74607)	(2,02197; 2,89520)
14	5,37032	0,124666	(5,08284; 5,65780)	(4,93371; 5,80694)
15	8,99220	0,119430	(8,71679; 9,26761)	(8,56344; 9,42096)
16	7,71161	0,113354	(7,45021; 7,97301)	(7,29171; 8,13151)
17	5,21147	0,113354	(4,95008; 5,47287)	(4,79157; 5,63137)
18	3,94073	0,113354	(3,67933; 4,20213)	(3,52083; 4,36063)

Response Surface Regression: PANJANG UPSET versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,22670	0,04626	134,617	0,000
V	0,41584	0,03101	13,408	0,000
F1	2,08809	0,03827	54,561	0,000
F2	1,06396	0,03101	34,306	0,000
V*V	-0,56800	0,02926	-19,410	0,000
F1*F1	-0,23306	0,03625	-6,429	0,000
F2*F2	-0,06961	0,02926	-2,379	0,049
V*F1	-0,19122	0,04309	-4,438	0,003
V*F2	0,18878	0,04309	4,381	0,003
F1*F2	-0,24122	0,04309	-5,598	0,001

S = 0,103493 PRESS = 0,345823
R-Sq = 99,88% R-Sq(pred) = 99,43% R-Sq(adj) = 99,72%

Analysis of Variance for PANJANG UPSET

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	61,0837	61,0837	6,7871	633,67	0,000
Linear	3	55,6355	38,4312	12,8104	1196,02	0,000
V	1	0,5480	1,9256	1,9256	179,78	0,000
F1	1	39,7213	31,8847	31,8847	2976,87	0,000
F2	1	15,3662	12,6057	12,6057	1176,91	0,000
Square	3	4,4901	4,5630	1,5210	142,01	0,000
V*V	1	4,0073	4,0352	4,0352	376,74	0,000
F1*F1	1	0,4390	0,4427	0,4427	41,33	0,000
F2*F2	1	0,0438	0,0606	0,0606	5,66	0,049
Interaction	3	0,9581	0,9581	0,3194	29,82	0,000
V*F1	1	0,2123	0,2109	0,2109	19,69	0,003
V*F2	1	0,4101	0,2056	0,2056	19,20	0,003
F1*F2	1	0,3357	0,3357	0,3357	31,34	0,001
Residual Error	7	0,0750	0,0750	0,0107		
Lack-of-Fit	3	0,0137	0,0137	0,0046	0,30	0,827
Pure Error	4	0,0613	0,0613	0,0153		
Total	16	61,1586				

Estimated Regression Coefficients for PANJANG UPSET using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	6,22670
V	0,247229
F1	1,24143
F2	0,632556
V*V	-0,200769
F1*F1	-0,0823786
F2*F2	-0,0246057
V*F1	-0,0675886
V*F2	0,0667286
F1*F2	-0,0852620

Predicted Response for New Design Points Using Model for PANJANG UPSET

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	6,22670	0,0462550	(6,11732; 6,33608)	(5,95865; 6,49475)
2	6,22670	0,0462550	(6,11732; 6,33608)	(5,95865; 6,49475)
3	6,22670	0,0462550	(6,11732; 6,33608)	(5,95865; 6,49475)
4	6,58554	0,0877239	(6,37810; 6,79297)	(6,26473; 6,90634)
5	6,22670	0,0462550	(6,11732; 6,33608)	(5,95865; 6,49475)
6	6,65721	0,0853205	(6,45546; 6,85896)	(6,34005; 6,97438)
7	1,54449	0,0978932	(1,31301; 1,77597)	(1,20763; 1,88135)
8	3,77728	0,0945171	(3,55378; 4,00077)	(3,44585; 4,10870)
9	6,22670	0,0462550	(6,11732; 6,33608)	(5,95865; 6,49475)
10	7,85346	0,0853205	(7,65171; 8,05521)	(7,53629; 8,17062)
11	4,24018	0,0826322	(4,04478; 4,43557)	(3,92702; 4,55333)
12	2,38103	0,0945171	(2,15754; 2,60453)	(2,04961; 2,71245)
13	5,36895	0,0905392	(5,15486; 5,58304)	(5,04380; 5,69410)
14	9,07951	0,0919589	(8,86207; 9,29696)	(8,75214; 9,40689)
15	7,81934	0,0905423	(7,60524; 8,03344)	(7,49418; 8,14449)
16	5,31920	0,0905423	(5,10510; 5,53330)	(4,99404; 5,64435)
17	3,92032	0,0826322	(3,72492; 4,11571)	(3,60716; 4,23347)

Lampiran 14

Regresi *Response Surface* Kekerasan

Response Surface Regression: KEKERASAN versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for KEKERASAN

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	40,6174	0,12864	315,755	0,000
V	0,8573	0,08534	10,046	0,000
F1	2,6396	0,08534	30,929	0,000
F2	-5,0222	0,08534	-58,848	0,000
V*V	-1,8490	0,08307	-22,260	0,000
F1*F1	-1,3012	0,08307	-15,664	0,000
F2*F2	1,3675	0,08307	16,463	0,000
V*F1	0,2750	0,11151	2,466	0,033
V*F2	0,4500	0,11151	4,036	0,002
F1*F2	-2,0000	0,11151	-17,936	0,000

S = 0,315399 PRESS = 7,16781

R-Sq = 99,83% R-Sq(pred) = 98,79% R-Sq(adj) = 99,68%

Analysis of Variance for KEKERASAN

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	591,465	591,465	65,718	660,64	0,000
Linear	3	449,690	449,690	149,897	1506,86	0,000
V	1	10,039	10,039	10,039	100,92	0,000
F1	1	95,161	95,161	95,161	956,62	0,000
F2	1	344,491	344,491	344,491	3463,04	0,000
Square	3	107,550	107,550	35,850	360,39	0,000
V*V	1	50,518	49,290	49,290	495,50	0,000
F1*F1	1	30,072	24,408	24,408	245,37	0,000
F2*F2	1	26,960	26,960	26,960	271,02	0,000
Interaction	3	34,225	34,225	11,408	114,68	0,000
V*F1	1	0,605	0,605	0,605	6,08	0,033
V*F2	1	1,620	1,620	1,620	16,29	0,002
F1*F2	1	32,000	32,000	32,000	321,68	0,000
Residual Error	10	0,995	0,995	0,099		
Lack-of-Fit	5	0,926	0,926	0,185	13,56	0,006
Pure Error	5	0,068	0,068	0,014		
Total	19	592,460				

Unusual Observations for KEKERASAN

Obs	StdOrder	KEKERASAN	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	7	32,000	32,497	0,246	-0,497	-2,51 R
17	17	41,900	41,376	0,246	0,524	2,65 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for KEKERASAN using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	40,6174
V	0,509708
F1	1,56930
F2	-2,98583
V*V	-0,653577
F1*F1	-0,459922
F2*F2	0,483363
V*F1	0,0972032
V*F2	0,159060
F1*F2	-0,706933

Predicted Response for New Design Points Using Model for KEKERASAN

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	40,6174	0,128636	(40,3308; 40,9041)	(39,8585; 41,3764)
2	40,6174	0,128636	(40,3308; 40,9041)	(39,8585; 41,3764)
3	40,6174	0,128636	(40,3308; 40,9041)	(39,8585; 41,3764)
4	47,8141	0,258113	(47,2390; 48,3892)	(46,9060; 48,7222)
5	40,6174	0,128636	(40,3308; 40,9041)	(39,8585; 41,3764)
6	40,6174	0,128636	(40,3308; 40,9041)	(39,8585; 41,3764)
7	32,4965	0,245799	(31,9488; 33,0442)	(31,6056; 33,3875)
8	49,1788	0,258113	(48,6037; 49,7539)	(48,2707; 50,0869)
9	39,0850	0,258113	(38,5099; 39,6601)	(38,1769; 39,9931)
10	32,1407	0,258113	(31,5655; 32,7158)	(31,2326; 33,0487)
11	36,0344	0,258113	(35,4593; 36,6096)	(35,1264; 36,9425)
12	40,6174	0,128636	(40,3308; 40,9041)	(39,8585; 41,3764)
13	32,8698	0,258113	(32,2947; 33,4449)	(31,9617; 33,7779)
14	52,9335	0,245799	(52,3859; 53,4812)	(52,0426; 53,8245)
15	39,3497	0,258113	(38,7745; 39,9248)	(38,4416; 40,2577)
16	34,2053	0,258113	(33,6302; 34,7804)	(33,2972; 35,1134)
17	41,3760	0,245799	(40,8283; 41,9237)	(40,4850; 42,2670)
18	36,0390	0,245799	(35,4913; 36,5866)	(35,1480; 36,9299)
19	36,8283	0,245799	(36,2806; 37,3760)	(35,9373; 37,7192)
20	33,9442	0,245799	(33,3966; 34,4919)	(33,0533; 34,8352)

Response Surface Regression: KEKERASAN versus V; F1; F2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for KEKERASAN

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	40,6167	0,04651	873,204	0,000
V	0,8573	0,03083	27,809	0,000
F1	2,4250	0,04028	60,199	0,000
F2	-5,0222	0,03083	-162,901	0,000
V*V	-1,8439	0,03288	-56,076	0,000
F1*F1	-1,3204	0,05857	-22,544	0,000
F2*F2	1,3726	0,03288	41,743	0,000
V*F1	0,2750	0,04028	6,827	0,000
V*F2	0,4500	0,04028	11,171	0,000
F1*F2	-2,0000	0,04028	-49,649	0,000

S = 0,113937 PRESS = 0,710272
R-Sq = 99,98% R-Sq(pred) = 99,87% R-Sq(adj) = 99,96%

Analysis of Variance for KEKERASAN

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	530,012	530,012	58,890	4536,44	0,000
Linear	3	401,574	401,574	133,858	10311,37	0,000
V	1	10,039	10,039	10,039	773,32	0,000
F1	1	47,045	47,045	47,045	3623,97	0,000
F2	1	344,491	344,491	344,491	26536,82	0,000
Square	3	94,213	94,213	31,404	2419,14	0,000
V*V	1	70,211	40,820	40,820	3144,48	0,000
F1*F1	1	1,381	6,597	6,597	508,22	0,000
F2*F2	1	22,620	22,620	22,620	1742,50	0,000
Interaction	3	34,225	34,225	11,408	878,81	0,000
V*F1	1	0,605	0,605	0,605	46,60	0,000
V*F2	1	1,620	1,620	1,620	124,79	0,000
F1*F2	1	32,000	32,000	32,000	2465,03	0,000
Residual Error	8	0,104	0,104	0,013		
Lack-of-Fit	3	0,036	0,036	0,012	0,87	0,517
Pure Error	5	0,068	0,068	0,014		
Total	17	530,116				

Estimated Regression Coefficients for KEKERASAN using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	40,6167
V	0,509708
F1	1,44174
F2	-2,98583
V*V	-0,651762
F1*F1	-0,466709
F2*F2	0,485178
V*F1	0,0972032
V*F2	0,159060
F1*F2	-0,706933

Predicted Response for New Design Points Using Model for KEKERASAN

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	40,6167	0,046515	(40,5094; 40,7239)	(40,3329; 40,9005)
2	40,6167	0,046515	(40,5094; 40,7239)	(40,3329; 40,9005)
3	40,6167	0,046515	(40,5094; 40,7239)	(40,3329; 40,9005)
4	47,5898	0,100072	(47,3591; 47,8206)	(47,2401; 47,9395)
5	40,6167	0,046515	(40,5094; 40,7239)	(40,3329; 40,9005)
6	40,6167	0,046515	(40,5094; 40,7239)	(40,3329; 40,9005)
7	48,9545	0,100072	(48,7237; 49,1853)	(48,6048; 49,3042)
8	39,2898	0,100072	(39,0591; 39,5206)	(38,9401; 39,6395)
9	32,3455	0,100072	(32,1147; 32,5763)	(31,9958; 32,6952)
10	35,8102	0,100072	(35,5794; 36,0409)	(35,4605; 36,1599)
11	40,6167	0,046515	(40,5094; 40,7239)	(40,3329; 40,9005)
12	32,6455	0,100072	(32,4147; 32,8763)	(32,2958; 32,9952)
13	52,9473	0,095811	(52,7263; 53,1682)	(52,6040; 53,2906)
14	39,5545	0,100072	(39,3237; 39,7853)	(39,2048; 39,9042)
15	34,4102	0,100072	(34,1794; 34,6409)	(34,0605; 34,7599)
16	36,0527	0,095811	(35,8318; 36,2737)	(35,7094; 36,3960)
17	36,8420	0,095811	(36,6211; 37,0630)	(36,4987; 37,1853)
18	33,9580	0,095811	(33,7370; 34,1789)	(33,6147; 34,3013)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian optimasi proses las gesek material baja SUH 3 ini dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kecepatan putaran spindel, gaya gesek, dan gaya tempa sebagai parameter proses las gesek material baja SUH 3 memiliki pengaruh signifikan terhadap respon hasil pengelasan berupa kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan.
2. Kombinasi parameter proses las gesek untuk menghasilkan respon kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan yang optimal adalah pada kecepatan putaran spindel sebesar 1500 rpm, gaya gesek sebesar 5,8 kN, dan gaya tempa sebesar 10 kN.
3. Prediksi nilai respon optimum menggunakan metode *respon surface* dan teknik *goal programming* untuk kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan berturut-turut adalah sebesar 122,3 kgf/mm², 6,9 mm, dan 41,3 HRC
4. Nilai respon kekuatan tarik, panjang *upset*, dan kekerasan yang optimum dari hasil percobaan konfirmasi memiliki rata-rata berturut-turut sebesar 122,8 kgf/mm², 6,9 mm, dan 41,2 HRC.
5. Hasil Uji-t satu sampel menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara hasil percobaan konfirmasi dengan prediksi nilai respon optimum.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian serupa dengan dua material berbeda jenis (*dissimilar material*)
2. Memasukkan waktu gesek sebagai parameter proses pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Jeffus, L., (2012), *Welding Principles and Applications, Seventh Edition* , Delmar Cengage Learning, New York.
- Kalpajian, S., Schmid, S.R., Musa, H., (2009), *Manufacturing Engineering and Technology, Sixth Edition, In Si Units*, New York, Pearson.
- Kirik, L. dan Ozdemir, N., (2014), “Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Welded Joints of AISI 1040/AISI 304L Steels”, *Materials and Technology*, Vol. 49, hal. 825-832.
- Kou, S., (2012), *Welding Metallurgy, Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Montgomery, D.C., (2012), *Design and Analysis of Experiments, Eighth Edition*, John Wiley & Sons, Inc., Arizona.
- Mulyono, S., (2002), *Riset Operasi*, Lembaga Penerbit Fakultas Ekonomi, Jakarta.
- Nunez, R.M., dkk., (1993), *ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, Ohio.
- O’Brien, A., dan Guzman, C., (2007), *Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 3, Welding Processes, Part 2*, AWS , Miami.
- Periyasamy, P., Elaiyaraja, K., dan Kavitha, K., (2015), “Optimization of Friction Welding Process to Eliminate Forking in Engine Valves”, *Indian Journal of Science*, Vol. 16, hal. 34-39.
- Pizzi, A., Mittal, K.L., (2003), *Handbook of Adhesive Technology, Second Edition, Revised and Expanded*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Shahab, A., (2010), “Aplikasi Respon Permukaan Dan Goal Programming Untuk Optimasi Morfologi Kolam Lasan Pada Pengelasan Inconel 625”, *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi*, Yogyakarta.
- Vairamani, G., Kumar, T.S., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., (2013), “Application of Response Surface Methodology to Maximize Tensile Strength and Minimize Interface Hardness of Friction Welded Dissimilar Joints of Austenitic Stainless Steel and Copper Alloy”, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, hal. 2250-2259.

Viswanathan, G., Kannan, T.T.M., Khan, M.A., Chandradass, J., Giridharan, S., (2015), “Optimization of Mechanical Properties of Friction Welding Parameters of Austenitic Stainless Steel (AISI 316) Rods Using Design of Experiments Concept”, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 10, hal. 091-096.

RIWAYAT HIDUP



Mochamad Muzaki - lahir di Tulungagung, Jawa Timur, 06 Juni 1986, merupakan anak ke tiga dari pasangan Ayahanda M. Syafi'i Bakri dan Ibunda Nuraini. Penulis memulai pendidikan formal pada jenjang sekolah dasar pada tahun 1992 di SDN Kampung Dalem V. Kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMPN 1 Tulungagung dan SMAN 1 Boyolangu. Tahun 2005 penulis melanjutkan pendidikan tingkat tinggi strata satu (S1) di Universitas Brawijaya, Jurusan Teknik Mesin. Setelah menyelesaikan studi S1, penulis melanjutkan pendidikan strata dua (S2) Jurusan Teknik Mesin, bidang keahlian Rekayasa dan Sistem Manufaktur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2014. Mengambil bidang keahlian Rekayasa dan Sistem Manufaktur, penulis melakukan penelitian mengenai optimasi kekuatan tarik, kekerasan, dan panjang *upset* hasil lasan baja suh 3 pada pengelasan gesek menggunakan metode *response surface* dan *goal programming*, sebagai tugas akhir program pendidikan S2. Penelitian ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Magister Teknik (MT).

Email: zaki_mochamad@yahoo.co.id